



**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica**



## **Proposta e simulação de uma rede de comunicação baseada no protocolo CAN para controle de um trem de laminação**

**Enrico André Santos Castro**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica [Automação]**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**Vitória, \_\_\_ de Dezembro de 2005**

**Proposta e simulação de uma rede de comunicação baseada no  
protocolo CAN para controle de um trem de laminação em Tandem**

**Enrico André Santos Castro**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica [Automação]**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**Vitória, \_\_\_\_ de Dezembro de 2005.**

**Proposta de simulação de uma rede de comunicação baseada no protocolo CAN para controle de um trem de laminação em Tandem**

**Enrico André Santos Castro**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.**

Aprovada em \_\_\_\_/ 12 /2005 por:

---

Prof. Dr. José Denti Filho, UFES  
Orientador

---

Prof. Dr. José Leandro Felix Salles, UFES  
Membro interno

---

Prof. Dr. Saul Munareto, CEFET-ES  
Membro externo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO  
Vitória, Dezembro de 2005

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

C355p Castro, Enrico André Santos, 1978-  
Proposta e simulação de uma rede de comunicação baseada no  
protocolo CAN para controle de um trem de laminação / Enrico André  
Santos Castro. – 2005.  
99 f. : il.

Orientador: José Denti Filho.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,  
Centro Tecnológico.

1. Automação industrial - Protocolos. 2. Automação - Simulação por  
computador. 3. Controle automático. 4. Sistemas de controle por  
realimentação. 5. Simulação (Computadores). 6. Laminação (Metalurgia).  
I. Denti Filho, José. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

---

## **AGRADECIMENTOS**

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Curvas obtidas a partir do modelo de Orowan .....	35
Tabela 2 – Faixa de variação dos parâmetros operacionais .....	37
Tabela 3 – Exemplo de uma seqüência de passes definida para laminação a quente (redução de espessura da tira de 10mm para 4mm) .....	43
Tabela 4 - Abreviaturas dos Controladores/Supervisores .....	48
Tabela 5 - Informações enviadas do CPSU para os controladores das cadeiras .....	50
Tabela 6 - Informações enviadas dos controladores das cadeiras para o CPSU .....	51
Tabela 7 - Informações trocadas entre o CC1 e os $\mu$ Locais sob sua supervisão .....	55
Tabela 8 - Informações trocadas entre o CC2 e os $\mu$ Locais sob sua supervisão .....	55
Tabela 9 - Informações trocadas entre o CC2 e os $\mu$ Locais sob sua supervisão .....	56
Tabela 10 – Relação das mensagens da rede CAN1 .....	78
Tabela 11 – Relação das mensagens da rede CAN2 .....	78
Tabela 12 – Relação das mensagens da rede CAN3 .....	79
Tabela 13 – Relação das mensagens da rede CAN4 .....	79
Tabela 14 – Mensagens da CAN1 ordenadas pela prioridade .....	95
Tabela 15 – Mensagens da CAN2 ordenadas pela prioridade .....	97
Tabela 16 – Mensagens da CAN3 ordenadas pela prioridade .....	98
Tabela 17 – Mensagens da CAN4 ordenadas pela prioridade .....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema Simplificado do laminador teórico de 3 cadeiras	
Figura 2 - Subsistema de Debobinamento .....	18
Figura 3 - Cadeira de Laminação.....	19
Figura 4 - Tensionamento da tira pelo subsistema do Looper .....	23
Figura 5 – Modelo de uma cadeira do laminador .....	26
Figura 6- Colina de Fricção .....	29
Figura 7 - Área sob a colina de Fricção .....	30
Figura 8 - Curva de Operação [3] .....	30
Figura 9 - Curva Linearizada [3].....	31
Figura 10 - (Diagrama de Operação) [3].....	32
Figura 11 - Curva de Operação variando $t_1$ , $t_2$ , $S$ , $\mu$ e $h_1$ [3] .....	34
Figura 12 – Curva de Operação $P \times h_2$ (exemplo).....	36
Figura 13 – Família de Curvas de Operação $P \times h_2$ variando-se $h_1$ (exemplo)	37
Figura 14 – Exemplos de curvas de sensibilidade (a) $P \times h_1$ e (b) $h_2 \times h_1$ .....	39
Figura 15 – Árvore de interação entre as .....	45
Figura 16 – Subsistemas supervisionados pelo controlador da cadeira 1.....	53
Figura 17 – Subsistemas supervisionados pelo controlador da cadeira 2.....	53
Figura 18 - Subsistemas supervisionados pelo controlador da cadeira 3. ....	54
Figura 19 – Blocos internos de uma (a) unidade de processamento, destacando o (b) controlador CAN e suas (c) caixas de mensagem .....	60
Figura 20 - Formato das mensagens – Can Padrão (a) e Can estendida(B) .....	63
Figura 21 – Exemplo para ilustrar o processo de arbitragem na CAN .....	64
Figura 22 - Rede de comunicação proposta por Muniz [4] .....	71
Figura 23 - Proposta para topologia física da rede .....	73
Figura 24 - Tela do CANdb++ - Base de dados da rede CAN 1 .....	81

Figura 25 - Modelo de uma ECU.....	83
Figura 26 - Topologia de uma rede CAN utilizando Gateways .....	83
Figura 27 - Painel de controle.....	84
Figura 28 – Definição da taxa de transmissão.....	87
Figura 29 – Fases de desenvolvimento de um sistema de controle .....	89
Figura 30 - Tela do simulador CANoe®.....	90
Figura 31 - Inter-relação entre os softwares do CANoe® .....	92



## LISTA DE SÍMBOLOS

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	13
1.1 - Apresentação: .....	13
1.2 - Desenvolvimento do trabalho: .....	14
2 - LAMINADOR DE TIRAS .....	16
2.1 - Debobinadeira: .....	17
2.2 - Cadeiras de laminação: .....	18
2.2.1 - Ajuste da espessura da cadeira de laminação .....	19
2.3 - Looper: .....	22
2.4 - Bobinadeira: .....	23
3 - MODELO TEÓRICO DO PROCESSO .....	25
3.1 - Colina da Fricção. ....	29
3.2 - Curva de Operação: .....	30
3.3 - Reta de Carga do Laminador. ....	31
3.4 - Diagrama de Operação: .....	32
3.5 - Alterações do Diagrama de Operação: .....	33
3.6 - Modelo Linearizado: .....	35
3.6.1 - Curvas e famílias de curvas de operação: .....	36
3.6.2 - Diagramas de operação linearizados .....	38
3.6.3 - Curvas de sensibilidade .....	38
4 – COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE .....	41
4.1 - Equações linearizadas de controle: .....	41
4.2 - Arvore de interações entre parâmetros operacionais: .....	44
4.3 - Definição das Informações trocadas entre os Controladores da rede: .....	47
4.3.1 - Informações trocadas entre os controladores das cadeiras e o computador do processo (CPSU): .....	49
4.3.2 - Informações trocadas entre os controladores das cadeiras: .....	51
4.3.3 - Informações trocadas entre os controladores das cadeiras e os controladores locais dos subsistemas: .....	53
5 - REDE DE COMUNICAÇÃO – PROTOCOLO CAN .....	58
5.1 - Introdução ao Protocolo CAN: .....	58
5.2 - Descrição do Protocolo CAN: .....	59
5.3 Definição da Rede .....	70
5.3 Definição das mensagens .....	73
6 -SIMULAÇÃO DA REDE .....	80
6.1 Simulador adotado .....	80
6.1.1 - Candb++ – Base de dados. ....	80
6.1.2 - <i>Panel (Editor/Generator)</i> – Interface com o usuário. ....	84
6.1.3 - Capl Generator – Gerador dos módulos de controle. ....	85
6.1.4 - CANoe® – Programa Principal (Gerenciador da simulação). ....	86
6.2 Avaliação do tráfego na rede .....	93
6.2.1 Avaliação teórica .....	93
6.2.2 – Avaliação pelo simulador .....	101
7-CONCLUSÕES.....	103
7.1 – Volume de tráfego e viabilidade da rede .....	103
7.2 – Sugestões de trabalhos futuros .....	103
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105

## RESUMO

**É apresentada a proposta e simulação de uma rede de comunicação e controle, baseada no protocolo CAN (*Control Área Network*), para um trem de laminação composto de três cadeiras visando provar a viabilidade de aplicação da rede citada em um laminador real a fim de criar uma solução eficaz, simples e econômica para o problema de comunicação entre as cadeiras e os diversos subsistemas relacionados.**

## **ABSTRACT**

# 1- INTRODUÇÃO

## 1.1 - Apresentação:

Esta dissertação expõe um estudo sobre o tráfego de informações entre os subsistemas (cadeiras, bobinadeira, debobinadeira e dois loopers entre cadeiras) de um laminador de tiras de 3 cadeiras em Tandem. A fim de se provar que é viável a utilização de um protocolo de alta velocidade (Protocolo Can), originalmente desenvolvido para aplicação em automóveis, para controle de um laminador de tiras, foi realizado um estudo sobre o processo de laminação e a interação entre os seus parâmetros operacionais e variáveis do processo de forma a compreender melhor o seu funcionamento e construir um banco de dados contendo informações detalhadas sobre estes parâmetros e variáveis.

O método proposto para demonstrar que o protocolo de comunicação escolhido suportaria satisfatoriamente o tráfego de mensagens entre os subsistemas do laminador, inclusive nas situações mais adversas, foi comparar o resultado teórico da taxa de ocupação do barramento com o valor obtido na simulação. Para isto o modelo teórico do laminador de tiras de 3 cadeiras em Tandem, apresentado em Muniz [4], foi utilizado como base para o modelo de rede teórico e simulado.

Foi proposta uma estratégia de controle (não simulada neste trabalho) para balizar a constituição das mensagens que trafegam no barramento de comunicação. O agrupamento dos parâmetros de controle e variáveis do

processo, os valores de set up, bem como a temporização e prioridade das mensagens foram definidas com base nesta estratégia.

Vale ressaltar que o objetivo deste trabalho foi demonstrar a viabilidade do protocolo de comunicação CAN – Control Área Network para aplicação no controle do processo de laminação. Não foi desenvolvida nenhuma estratégia de controle do dito processo em nível de simulação.

## **1.2 - Desenvolvimento do trabalho:**

No capítulo 2 é apresentado o laminador e seus subsistemas destacando as características de cada um bem como as variáveis e parâmetros operacionais.

No capítulo 3 é exposto o modelo teórico do sistema de laminação focando resumidamente a análise qualitativa das variáveis e dos parâmetros operacionais. A análise qualitativa do modelo não foi aprofundada por não ser objeto de discussão nesta dissertação.

No capítulo 4 é abordada uma estratégia de controle, desenvolvida por Muniz [4], baseada na interação das diversas variáveis e parâmetros de todos os subsistemas do laminador. É discutido neste capítulo quais as informações trocadas entre os controladores, que são responsáveis pelo funcionamento do sistema de laminação, visando principalmente o controle da espessura e planicidade da tira.

No capítulo 5 a rede de comunicação proposta é apresentada. É realizado o modelamento físico e lógico da rede de comunicação, baseado no protocolo CAN – Control Área Network, com definição da arquitetura física da rede e das mensagens que irão trafegar pela mesma.

No capítulo 6 é mostrado que para simular o processo de laminação foi utilizada a versão demo do Software alemão CANOE® da Vector que consiste em um conjunto de 4 programas integrados: (CANoe®, Candb++, Panel editor e Capl generator, detalhados neste capítulo) para a construção da rede. Este software apresenta uma interface bastante amigável e inúmeros recursos que possibilitaram uma simulação completa do processo. Também são apresentados neste capítulo os resultados obtidos na simulação que demonstrará a possibilidade de utilização da rede de comunicação proposta para controle do laminador em questão.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre o tráfego e a viabilidade da rede de comunicação proposta. É também discutido neste capítulo propostas de expansão e melhoramento da rede.

## 2 - LAMINADOR DE TIRAS

A laminação de produtos planos é um processo de conformação mecânica que consiste em fazer o material passar entre 2 cilindros rotativos, com rotações de sentidos opostos, afastados de uma distância menor que a espessura do material a ser laminado, de modo a causar neste material uma deformação permanente correspondendo a redução de espessura desejada.

Na prática, não se consegue a redução de espessura desejada com apenas uma translação do material entre os cilindros, mas sim com uma série de translações sucessivas que são chamadas de seqüência de passes. Este processo pode ser realizado por um sistema de laminação composto por uma única cadeira, neste caso um laminador reversível, ou por outro, composto por um conjunto de cadeiras, ou seja, um conjunto jogos de cilindros em série chamado de trem contínuo de laminação (Tandem).

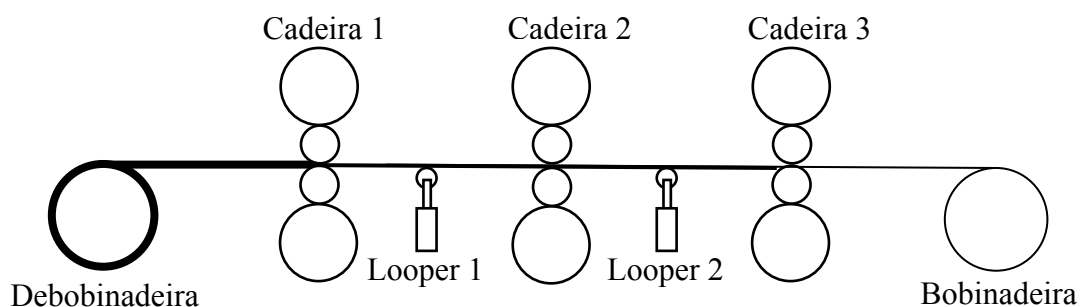


Figura 1 - Esquema Simplificado do laminador teórico de 3 cadeiras



O processo de laminação é consideravelmente complexo, pois as variáveis envolvidas apresentam alto grau de acoplamento, ou seja, qualquer distúrbio em qualquer destas variáveis altera o funcionamento do sistema como um todo e na maioria dos casos altera também o valor das outras variáveis. Esta inter-relação entre as variáveis será discutida com mais detalhes no capítulo 4.

O laminador teórico de 3 cadeiras utilizado é ilustrado na figura 1 e é composto dos seguintes subsistemas:

### **2.1 - Debobinadeira:**

A debobinadeira contém a tira a ser laminada. Essa tira tem a espessura e a largura previamente conhecidas. O valor da espessura da lâmina é um parâmetro importante para o processo de laminação e é representado pelo símbolo  $h_{1,1}$  – espessura de entrada da cadeira 1. O acionamento da debobinadeira pode ser feito por um motor AC (síncrono ou assíncrono) com controle de velocidade por cicloconversor ou por um motor CC com o acionamento adequado. Esse motor é equipado com um encoder, o que torna possível o controle de sua posição, bem como o cálculo do raio atual da debobinadeira (quando a mesma estiver sendo debobinada), parâmetro que influenciará na velocidade angular do motor, visto que a velocidade linear (a tensão na tira) deverá ser mantida constante durante a laminação para uma dada tensão aplicada na tira sob laminação.

Este subsistema possui potência relativamente alta e inércia que varia de acordo com a quantidade de material restante na bobina. O controle do torque

do motor da debobinadeira influencia diretamente sobre um dos parâmetros essenciais para o controle do sistema de laminação em questão que é a tensão sobre a tira a ser laminada, a tensão  $t_{1,1}$ .

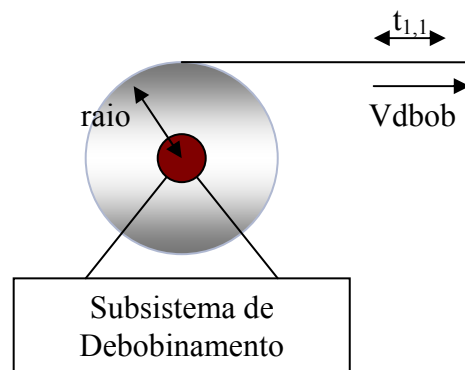


Figura 2 - Subsistema de Debobinamento

## **2.2 - Cadeiras de laminação:**

As cadeiras de laminação são compostas dos dispositivos ilustrados na figura 2. Os cilindros de trabalho são acionados (o acionamento não está ilustrado) por motores elétricos.

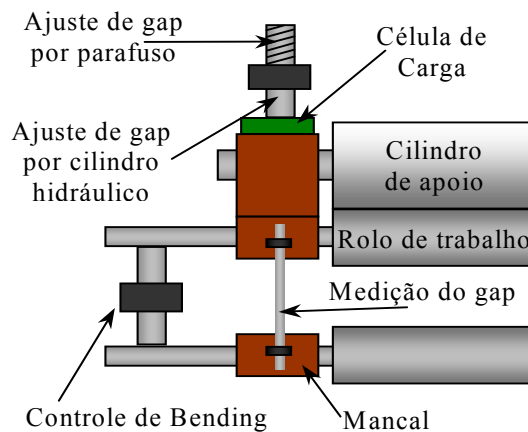


Figura 3 - Cadeira de Laminação

O parâmetro mais importante na cadeira de laminação sob o ponto de vista de controle da espessura do material, variável chave deste estudo, é o gap. O gap, que vem a ser a abertura entre o cilindro de trabalho superior e o inferior, pode ser ajustado tanto através de um sistema eletro-mecânico – conjunto de motor, coroa e parafuso com rosca sem-fim (ajuste grosso) quanto através de um sistema hidráulico (ajuste fino).

### **2.2.1 - Ajuste da espessura da cadeira de laminação**

Toda a estratégia de controle, no que diz respeito à correção de espessura de saída da tira em cada cadeira, durante o processo de laminação, em laminadores / trens acabadores de usinas siderúrgicas ao redor do mundo (Usiminas, CSN e Acesita, no Brasil, Carlam, na Bélgica, Eko Stahl, na Alemanha, apenas para citar algumas), é baseada em ajustes do gap, sob responsabilidade de sistemas chamados AGC (Automatic Gage Control, i.e.,

Controle Automático de Espessura) ou HAGC (Hidráulic Automátic Gage Control, i.e., Controle automático hidráulico de espessura). Isto se deve ao fato de se atuar em um subsistema, de potência relativamente baixa, cuja influência é direta na grandeza alvo do processo ( $h_{2,i}$  – espessura de saída da cadeia i), apresentando resposta extremamente rápida aos distúrbios (com a utilização das cápsulas hidráulicas), conseguindo compensá-los ainda na própria cadeia onde estes ocorreram, com um trecho mínimo da tira fora da faixa de valores especificada para a espessura de saída. Como desvantagem, é grande a influência de uma atuação neste subsistema sobre a forma da tira.

#### **2.2.1.1 - Ajuste pelo parafuso de aperto**

O ajuste do gap pelo sistema de parafusos de aperto, com rosca sem-fim, para correção da espessura da tira, é bastante antigo e já ultrapassado para trens contínuos de laminação, apresentando, como desvantagem, baixa velocidade de resposta (em virtude da carga de laminação elevada, o ângulo do fio do parafuso é extremamente agudo), devido à qual este vem sendo gradualmente substituído por sistemas hidráulicos que desempenhem a mesma função nos laminadores em tandem.

O sistema com parafusos ainda é aplicado mesmo em laminadores mais modernos, principalmente reversíveis, mas sempre em conjunto com o sistema hidráulico, ficando o primeiro responsável pelo posicionamento inicial do cilindro de trabalho antes de cada passe (setup), enquanto que com o último fazem-se as correções de espessura da tira durante esses passes (ajuste fino).

Como vantagem, este sistema permite que se utilize uma cápsula hidráulica com comprimento (curso) menor, o que não seria determinante para o laminador de tiras em estudo (ainda que fosse trabalhar como reversível), e sim, para laminadores desbastadores (rough mill) de placas, cujas reduções de espessura em cada passe são muito mais significativas.

#### **2.2.1.2 - Ajuste pela cápsula hidráulica**

Como já mencionado, a aplicação da cápsula hidráulica no ajuste do gap foi um grande advento para a laminação de planos, aliando velocidade de resposta e precisão, garantindo maior quantidade do produto dentro das especificações (considerando ainda que os pequenos trechos não-conformes podem ser eliminados atuando-se em cadeiras subseqüentes).

Outro parâmetro que influencia na espessura final da tira, presente na cadeira de laminação, é a velocidade dos cilindros, porém, devido à elevada potência e, principalmente, ao fato de que uma alteração na velocidade dos cilindros (para compensar uma variação no coeficiente de atrito ou nas tensões, por exemplo) acarreta na alteração da tensão a ré e a frente, para a cadeira em questão, exigindo, portanto, ajustes tanto na cadeira subseqüente quanto na anterior, para restabelecer os valores-alvo das tensões na tira, não é recomendável uma atuação neste subsistema, sendo indicado atuar sempre nos loopers, localizados entre cadeiras adjacentes do laminador.

Por outro lado, quando os loopers se aproximam dos seus limites de curso inferior ou superior, torna-se imprescindível atuar na velocidade dos cilindros, colocando o(s) looper(s) em uma posição mais favorável, restabelecendo uma condição em que estes tenham boa margem de atuação e, com isso, mantendo-os com a responsabilidade pelo controle das tensões entre cadeiras.

### **2.3 - Looper:**

O sistema de looper é composto por um cilindro hidráulico e uma célula de carga em sua base, podendo ser medido o deslocamento do cilindro bem como o esforço na célula de carga.

O looper é amplamente utilizado em trens contínuos de laminação como uma “haste” acoplada a um eixo acionado por um motor elétrico ou, mais recentemente, com um sistema hidráulico responsável por seu posicionamento. Através da variação da inclinação desta haste, altera-se a tensão na tira entre duas cadeiras adjacentes. Na base do looper está instalada uma célula de carga que possibilita a medição do esforço realizado pela haste e, com base no modelo matemático do mesmo e nas características físicas do material laminado, tem-se o valor da tensão na tira.

É um sistema de potência baixa, com grande capacidade de resposta e que torna esporádicas as atuações no acionamento dos cilindros de trabalho.

Este subsistema é peça-chave para o laminador a ser estudado, pois o looper será utilizado não apenas para restabelecer uma tensão previamente

estipulada, no setup do laminador, para os controladores locais, mas, também, para correções da espessura da tira, normalmente em conjunto com atuações no subsistema de ajuste do gap, uma vez que correções através desse subsistema comprometem muito pouco a forma da tira. Entende-se por forma à geometria e à distribuição de tensões residuais da tira.

A tensão imposta na tira, pelo deslocamento vertical  $Y$  do looper, resulta em um alongamento da mesma levando a um aumento de tensão na tira.

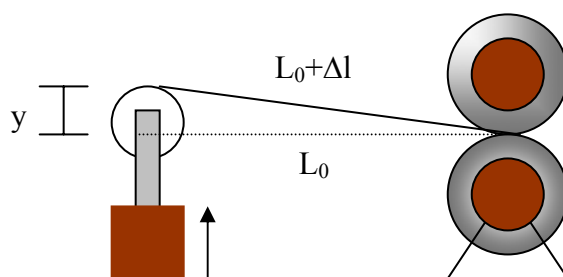


Figura 4 - Tensionamento da tira pelo subsistema do Looper

## **2.4 - Bobinadeira:**

Assim como a debobinadeira, a velocidade angular da bobinadeira variará à medida que o raio da bobina variar. Para cálculo do raio, é utilizada a medição da espessura e a diâmetro atual da bobina, com base no dado do encoder do motor que aciona a bobinadeira.

Outra particularidade é que, neste sistema, o torque gerado pela tensão  $t_{2,3}$  (tensão à frente na cadeira 3) exercida sobre a tira, entre a bobinadeira e o

terceiro stand, age “contra” o movimento (a tensão  $t_{1,1}$  faz o oposto pelo debobinamento, ou seja, “auxilia” no movimento).



### 3 - MODELO TEÓRICO DO PROCESSO

Para este trabalho não será necessária à análise quantitativa do modelo do processo. Apenas equações relevantes ao estudo proposto serão descritas. Será realizada uma análise qualitativa das variáveis e parâmetros que fazem parte do processo de laminação bem como a relação entre as mesmas.

Foram consideradas como base para análise qualitativa, as variáveis relacionadas no modelo matemático de Orowan por ser o mais completo, preciso e confiável.

De acordo com o modelo de Orowan, a carga ( $P_o$ ) e o torque de laminação ( $M_o$ ) são calculados a partir da distribuição de pressões radiais e esforço cortante no arco de contato (interface cilindro tira) e podem ser determinados, respectivamente, pelas expressões:

$$P_o = W.Rd. \left[ \int_0^{\phi m} p(\phi). \cos \phi. d\phi - \int_0^{\phi n} \tau(\phi). \sen \phi. d\phi + \int_{\phi n}^{\phi m} \tau(\phi). \sen \phi. d\phi \right] \quad (3.1)$$

Onde, para atrito de escorregamento,

$$\tau(\phi) = \mu.p(\phi) \quad (3.2)$$

E, para atrito de agarramento,

$$\tau(\phi) = \frac{S(\phi)}{2} \quad , \quad (3.3)$$

$$M_o = W.R.Rd.\left[\int_0^{\phi_m} \phi.p(\phi).d\phi + \frac{t_1 \cdot h_1 - t_2 \cdot h_2}{2 \cdot Rd}\right] \quad (3.4)$$

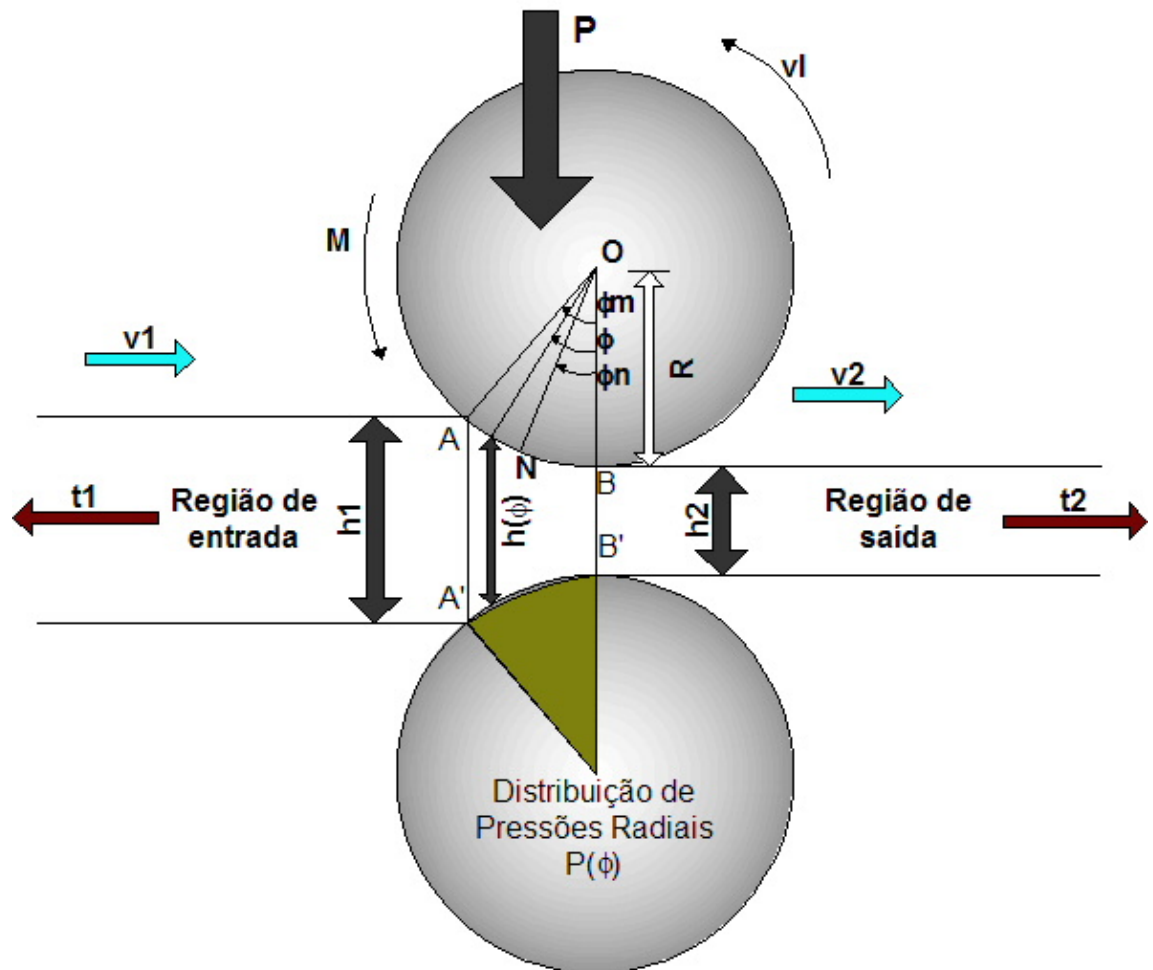


Figura 5 – Modelo de uma cadeia do laminador

A carga de laminação,  $P_o$ , e o torque de laminação,  $M_o$ , são função das seguintes variáveis:

W	≡ Largura da tira
R	≡ Raio do cilindro de trabalho

Rd	≡ Raio deformado do cilindro de trabalho
$\phi$	≡ Posição angular atual no arco de contato
$\phi_m$	≡ Ângulo máximo (ângulo do arco de contato)
$\phi_n$	≡ Ângulo neutro (ponto de pressão de laminação máxima)
$\mu$	≡ Coeficiente de atrito na interface cilindro / tira
S	≡ Tensão de escoamento do material sendo laminado
T1	≡ Tensão a ré
T2	≡ Tensão à frente
h1	≡ Espessura de entrada da tira
h2	≡ Espessura de saída da tira

A tensão a ré ( $t_1$ ) e a tensão à frente ( $t_2$ ) dependem diretamente do valor do escorregamento a ré ( $s_r$ ) e a frente ( $s_f$ ) do material não mencionado acima.

Os valores  $P_o$  e  $M_o$  são referentes somente à deformação plástica (não reversível) do material. Para se encontrar os novos valores reais de carga e torque,  $P$  e  $M$ , deve se levar em consideração a deformação elástica do material tanto na entrada quanto na saída da tira do laminador. A carga real  $P$  pode ser equacionada como:

$$P = P_o + P_{e1} + P_{e2} \quad (3.5)$$

Onde:

$P_{e1}$  = Componente de deformação elástica para entrada do arco de contato

$P_{e2}$  = Componente de deformação elástica para saída do arco de contato

O torque real  $M$  pode ser equacionado como:

$$M = M_o + W(M_{e1} + M_{e2}) \quad (3.6)$$

Onde:

$$M_{e1} = \mu \cdot R_d \cdot P_{e1} \quad (3.7)$$

$$M_{e2} = \mu \cdot R_d \cdot P_{e2} \quad (3.8)$$

$P_{e1}$  e  $P_{e2}$  dependem das seguintes variáveis:

$P_t$	$\equiv$ Coeficiente de Poisson da tira
$\Delta h$	$\equiv$ Diferença entre a espessura de entrada e saída da tira ( $h_1 - h_2$ )
$Y_t$	$\equiv$ Módulo de Young da tira
$S$	$\equiv$ Tensão de escoamento do material

Para calcular a Carga ( $P$ ) e o torque de laminação ( $M$ ) alguns parâmetros devem ser calculados previamente. São eles: raio deformado do cilindro ( $R_d$ ), largura final da tira ( $W_2$ ) e tensão de escoamento ( $S$ ).

Todos os parâmetros que devem ser calculados previamente para a determinação dos valores de Carga ( $P$ ), Torque ( $M$ ), tensão a ré ( $t_1$ ) e tensão à frente ( $t_2$ ) dependem diretamente do valor do ângulo do arco de contato ( $\phi$ ).

### 3.1 - Colina da Fricção.

A distribuição de pressões radiais ao longo do arco de contato, é obtida pelo cálculo de diversos valores de pressão radial da entrada para a saída e da saída para a entrada da cadeira de laminação. Tomando-se o menor valor de pressão dentre as leituras para cada valor de ângulo do arco de contato tem-se a curva chamada colina de fricção.

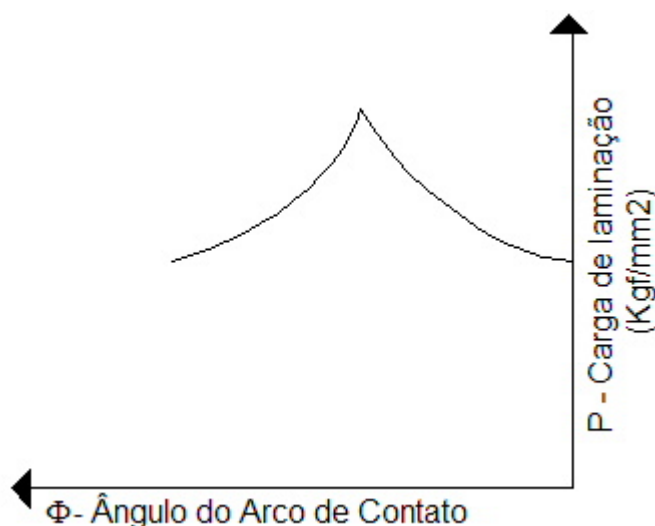


Figura 6- Colina de Fricção

A determinação e a análise da colina de fricção são de suma importância para garantir que a forma da tira esteja dentro dos padrões desejados visto que, segundo Bryant [1], o coroamento (perfil abaulado da secção axial dos cilindros de trabalho, cuja influência é direta sobre a forma da tira) está diretamente relacionado com a área sob a curva da região de entrada da colina de fricção (cf1)

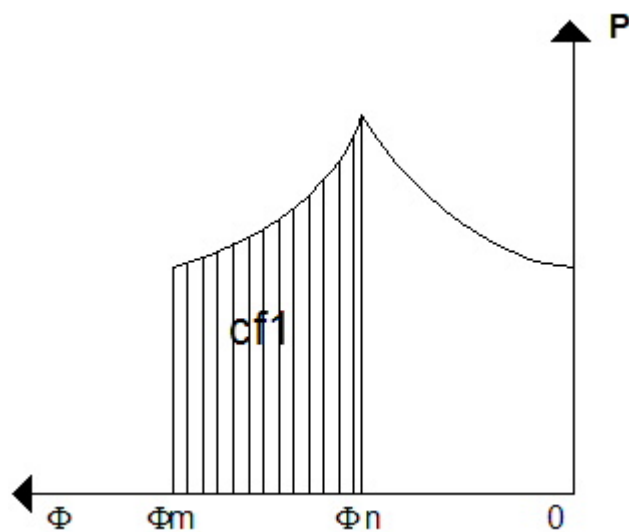


Figura 7 - Área sob a colina de Fricção

### 3.2 - Curva de Operação:

A Curva de Operação do processo relaciona a Carga de Laminação ( $P$ ) com a Espessura da tira ( $h$ ).

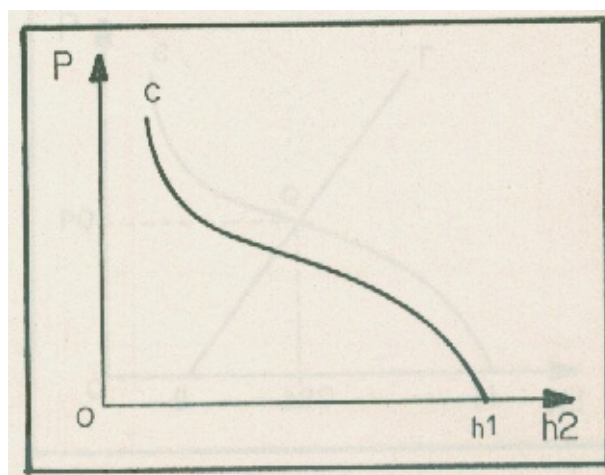


Figura 8 - Curva de Operação [3]

A curva de operação pode ser obtida basicamente de duas formas: A primeira, através de simulação do modelo matemático do processo e a

segunda, experimentalmente, ou seja, com valores do próprio laminador o que seria um processo custoso e exaustivo.

Segundo Denti [3] a Curva de Operação pode ser linearizada de modo a permitir a utilização dos dados aproximados nas tomadas de decisão de controle, de forma eficaz, no processo de laminação.

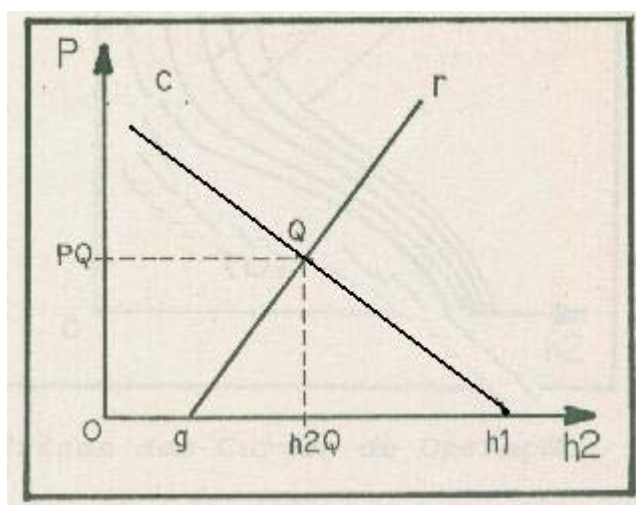


Figura 9 - Curva Linearizada [3]

Maiores detalhes sobre o modelo linearizado serão apresentados na seção 3.6.

### **3.3 - Reta de Carga do Laminador.**

A Reta de carga é a curva que relaciona as mesmas grandezas da Curva de Operação definida anteriormente porém sobre o ponto de vista do comportamento do laminador.

Durante o processo de laminação, o laminador, isto é, a(s) cadeira(s) de laminação, se distende (em) elasticamente. Isto acontece porque a cadeira é

deformável e em consequência disto a espessura de saída ( $h_2$ ) é maior que a abertura entre os cilindros, chamada de gap.

A Reta de carga é uma reta no plano  $P \times h_2$  para um valor de gap determinado, ou seja, se o valor do gap variar tem-se outra Reta de Carga.

### **3.4 - Diagrama de Operação:**

O Diagrama de Operação é o nome dado à sobreposição da Curva de Operação do Processo com a Curva de Reação do Sistema mais comumente chamada de Reta de Carga do Laminador.

A interseção da reta de carga com a Curva de Operação determina o ponto de funcionamento, ou valores Quiescentes da laminação, isto é a Carga desenvolvida e a Espessura obtida.

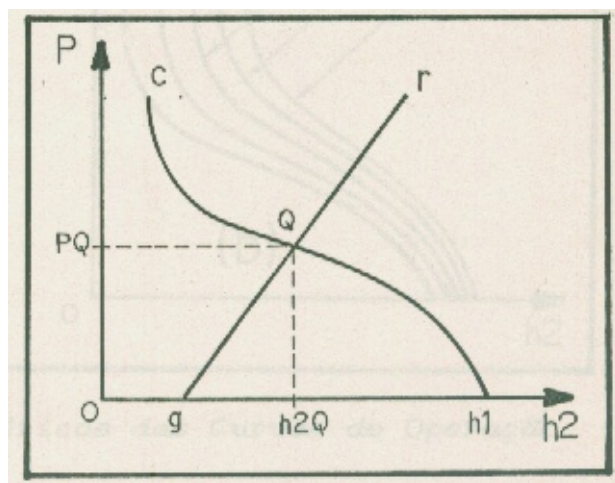


Figura 10 - (Diagrama de Operação) [3]



### **3.5 - Alterações do Diagrama de Operação:**

Como foi mencionado anteriormente o diagrama de operação é a interseção da curva de operação e a reta de carga, que são obtidas a partir dos modelos teóricos de laminação. Estes modelos são funções de parâmetros operacionais como: coeficiente de atrito ( $\mu$ ), gap ( $g$ ), tensões de escoamento ( $S$ ), tensões a ré ( $t_2$ ), tensões à frente ( $t_1$ ), velocidade de laminação ( $v_l$ ), espessura de entrada ( $h_1$ ) e também a espessura de saída desejada ( $h_2$ ). Consequentemente as curvas de Operação e de Reação do sistema são alteradas quando algum parâmetro operacional citado sofre alguma variação.

Modificando o valor do gap a reta de carga sofre um movimento translacional horizontal, paralelamente ao eixo das abscissas porém sem modificar sua inclinação. Com a variação do gap, a Curva de Operação também se modifica, pois, esta variação do gap altera o valor do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) e a tensão de escoamento ( $S$ ), modificando a inclinação da Curva.

Como mencionado no parágrafo anterior, uma variação tanto no coeficiente de atrito ( $\mu$ ), quanto na tensão de escoamento ( $S$ ), altera a inclinação da curva de Operação modificando o ponto de interseção com a reta de carga e consequentemente o valor da espessura de saída ( $h_2$ ) da tira. A inclinação desta Curva também é alterada quando a relação entre tensão à frente e tensão a ré,  $t_1/t_2$ , sofre uma variação.

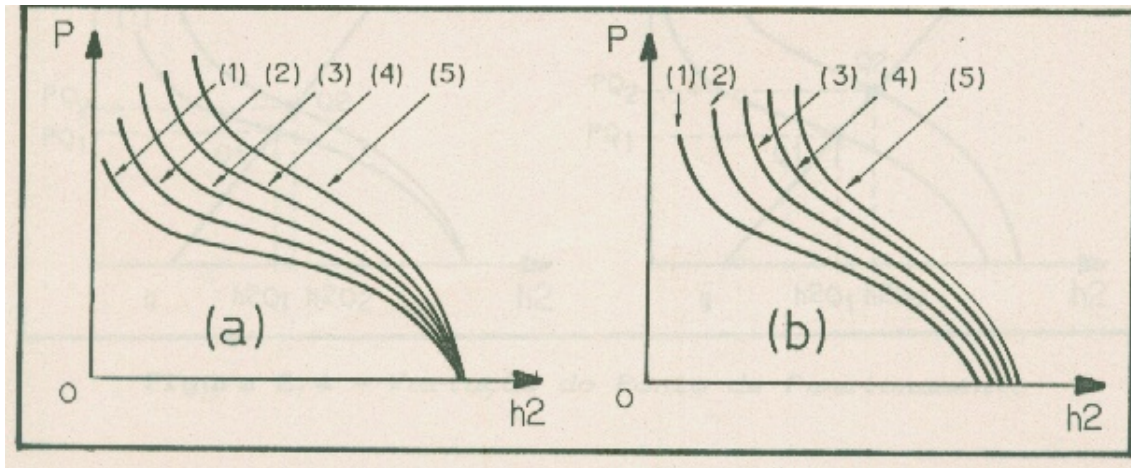


Figura 11 - Curva de Operação variando  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $S$ ,  $\mu$  e  $h_1$  [3]

Parâmetro	Figura	Ordem
$\mu$	11.a	(1) < (2) < (3) < (4) < (5)
$S$		(1) < (2) < (3) < (4) < (5)
$t_1/t_2$		(1) > (2) > (3) > (4) > (5)
$h_1$	11.b	(1) < (2) < (3) < (4) < (5)

A variação na velocidade do cilindro pode ter como conseqüências:

- Modificação do coeficiente de atrito
- Modificação da tensão de escoamento
- Modificação das tensões intercadeiras.

Por estes motivos que a variação de velocidade não será adotada como estratégia de controle para corrigir desvios no processo de laminação. Este assunto será discutido no capítulo 4.

### **3.6 - Modelo Linearizado:**

O modelo linearizado do laminador em questão é obtido através da linearização da Curva de Operação real teórica do processo. Esta linearização foi obtida utilizando o aplicativo Lamina Pro 1.0 (Muniz & Denti [6]), para Microsoft® Windows®, que utiliza uma rotina de linearização (método dos mínimos quadrados) para obter a linearização da curva de operação. Além da linearização o aplicativo disponibiliza, para consulta e impressão 64 (sessenta e quatro) curvas ao todo, divididas em curvas de operação, famílias de curvas de operação para variações de um determinado parâmetro operacional e curvas de sensibilidade (TABELA 1). O conceito, a obtenção e a valia destas curvas serão apresentadas a seguir

Tabela 1 – Curvas obtidas a partir do modelo de Orowan

	Curvas de Operação	Famílias de Curvas	Curvas de Sensibilidade
DESCRÇÃO	<p>P X h2</p> <p>M X h2</p>	<p>P X h2 ; M X h2</p> <p>Variando-se <math>\mu</math>; vl; t1; t2; h1; S</p>	<p>Sensibilidade de h2; P; M</p> <p>a</p> <p><math>\mu</math>; vl; t1; t2; h1; S</p>
QUA	04	24	36
Curvas reais e linearizadas			

### 3.6.1 - Curvas e famílias de curvas de operação:

Como citado anteriormente, a Curva de Operação do processo relaciona a Carga de Laminação (P) com a Espessura da tira (h).

As curvas de operação, linearizadas por uma rotina de quadrados mínimos, são obtidas variando-se o valor da espessura de saída da tira,  $h_2$ , em  $\pm 0,05$  mm em torno de seu valor quiescente, utilizando vinte pontos igualmente espaçados compreendidos nesta faixa, sendo que, para cada um destes, tem-se um valor correspondente de P (FIGURA 14) e M.

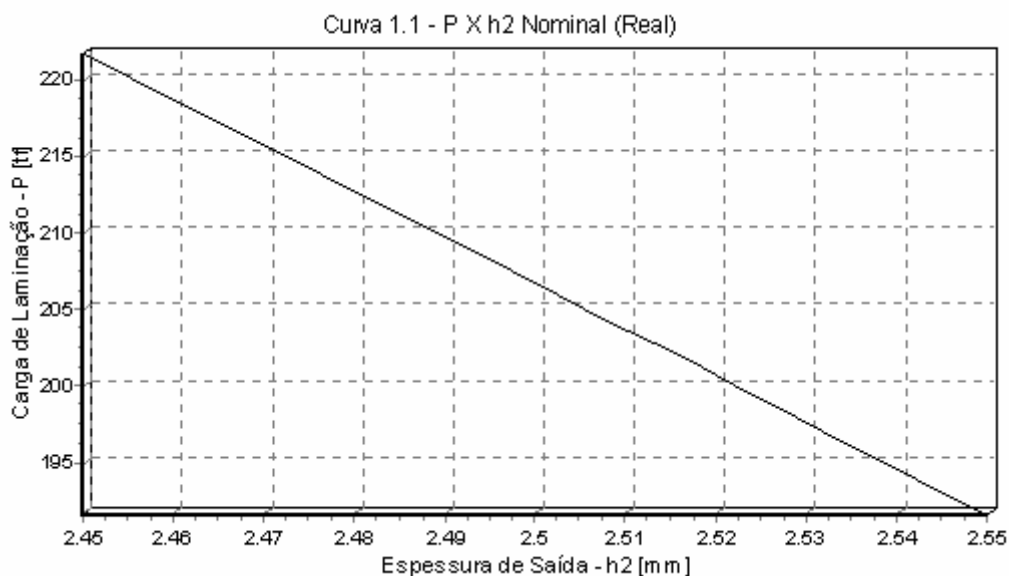


Figura 12 – Curva de Operação P X  $h_2$  (exemplo)

Para cada uma das famílias de curvas de operação (Conjunto de curvas de operação obtidas para variações de um único parâmetro operacional -  $\mu, t_1, t_2, v_l, h_1$  e S) , como P X  $h_2$  variando  $h_1$ , por exemplo (FIGURA 15), tem-se 11 (onze) curvas de operação, sendo cinco para valores decrescentes do parâmetro operacional escolhido, uma para as condições nominais de

operação e cinco para valores crescentes daquele parâmetro operacional, que normalmente varia dentro de uma faixa de valores (TABELA 2), definida empiricamente por Bryant [7].

Tabela 2 – Faixa de variação dos parâmetros operacionais

Parâmetro Operacional	Variação
Coeficiente de Atrito ( $\mu$ )	$\pm 20\%$
Tensão de Escoamento (S)	$\pm 10\%$
Tensão a Ré ( $t_1$ )	$\pm 30\%$
Tensão a Frente ( $t_2$ )	$\pm 30\%$
Espessura de Entrada ( $h_1$ )	$\pm 10\%$
Velocidade de Laminação ( $v_l$ )	$\pm 10\%$

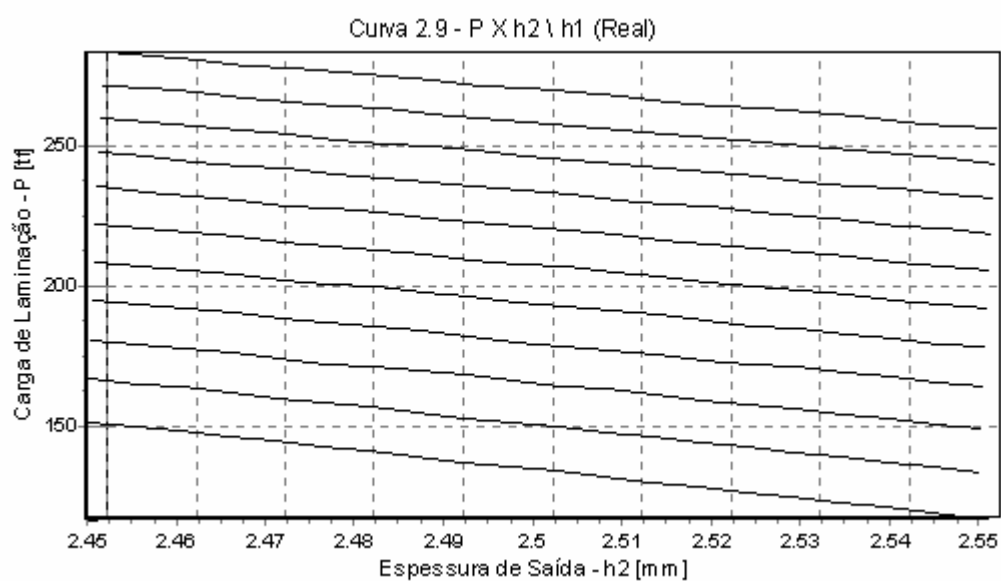


Figura 13 – Família de Curvas de Operação P X  $h_2$  variando-se  $h_1$  (exemplo)

### **3.6.2 - Diagramas de operação linearizados**

Utilizando as famílias de curvas geradas pelo Lamina Pro 1.0 é possível se obter um conjunto de diagramas de operação linearizados que indicam o valor da carga,  $P$ , para cada valor de espessura de saída,  $h_2$ , variando um dos parâmetros operacionais já citados anteriormente.

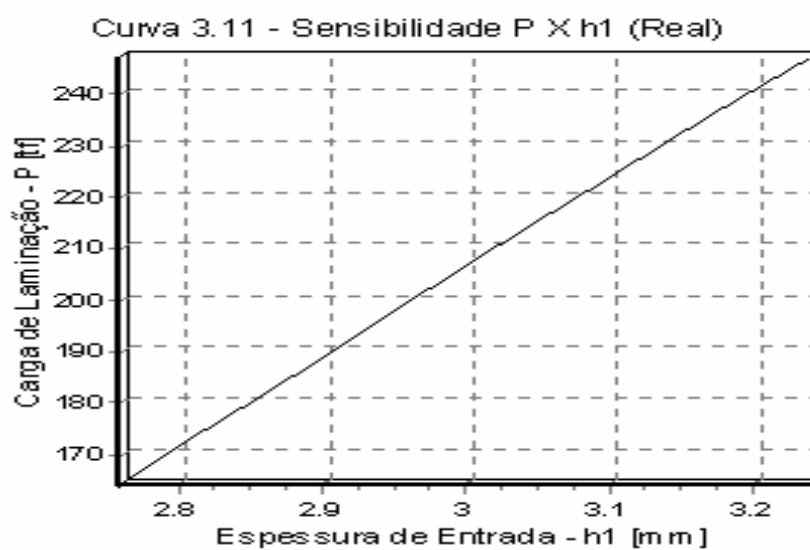
### **3.6.3 - Curvas de sensibilidade**

As curvas de sensibilidade são obtidas pela interseção das famílias de curvas de operação, com a reta de carga do laminador, definida pela equação 3.9

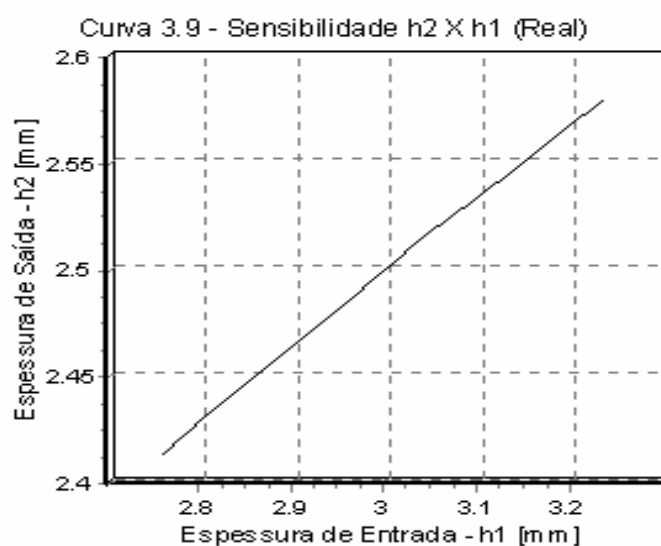
$$P = E_{LMN} \cdot (h_2 - g) \quad (3.9)$$

Onde  $E_{LMN}$  é o módulo de rigidez da cadeira do laminador, que é constante para uma dada largura da tira, e um valor típico é 500 kgf/mm.

Por exemplo, a família de curvas  $P \times h_2$  variando  $h_1$ , ao ser “cortada” pela reta de carga, origina 11 pontos  $(P, h_1)$  e 11  $(h_2, h_1)$ , com os quais se traça às curvas de sensibilidade  $P \times h_1$  e  $h_2 \times h_1$  (FIGURA 16.a e 16.b, respectivamente). E, por sua vez, cada um desses pontos de coordenada  $(h_2, h_1)$  tem um valor correspondente de torque de laminação (pelas curvas  $M \times h_2$  variando  $h_1$ ) e, por conseguinte, têm-se também as curvas de sensibilidade  $M \times h_1$ .



(a)



(b)

Figura 14 – Exemplos de curvas de sensibilidade (a)  $P \times h_1$  e (b)  $h_2 \times h_1$

Porém, como se vê, para obter as curvas de sensibilidade, deve-se executar os cálculos do modelo de Orowan repetidas vezes, o que pode demorar um tempo considerável, tornando esta uma tarefa crítica para se atingir o objetivo de controlar em tempo real o processo.

A partir das informações contidas nas curvas de sensibilidade é possível equacionar a influência das variações dos parâmetros operacionais na carga  $P$  no torque  $M$  e na espessura de saída  $h_2$  e assim traduzir o modelo de Orowan em um conjunto de equações simples, para um determinado ponto de operação, facilitando assim a elaboração de estratégias para controle do laminador. Este equacionamento será explicado no capítulo 4.



## 4 – COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE

A estratégia de controle descrita em Muniz [4] servirá de base para definir o comportamento e as informações trocadas entre os controladores dos subsistemas de laminação através da rede de comunicação e controle utilizada neste trabalho.

### 4.1 - Equações linearizadas de controle:

Através do método da regressão linear múltipla, detalhado em Muniz [4], determinou-se um conjunto de equações lineares para a carga,  $P$ , o torque,  $M$ , a espessura de saída,  $h_2$  e a área sob a colina de fricção,  $cf_1$ , em função dos parâmetros operacionais ( $\mu, t_1, t_2, vl, h_1, S$ ) e o gap.

$$P = a_0 + a_1.\mu + a_2.h_1 + a_3.t_1 + a_4.t_2 + a_5.vl + a_6.S + a_7.g \quad (4.1)$$

$$M = b_0 + b_1.\mu + b_2.h_1 + b_3.t_1 + b_4.t_2 + b_5.vl + b_6.S + b_7.g \quad (4.2)$$

$$h_2 = c_0 + c_1.\mu + c_2.h_1 + c_3.t_1 + c_4.t_2 + c_5.vl + c_6.S + c_7.g \quad (4.3)$$

$$cf_1 = d_0 + d_1.\mu + d_2.h_1 + d_3.t_1 + d_4.t_2 + d_5.vl + d_6.S + d_7.g \quad (4.4)$$

As informações das curvas de sensibilidade e das colinas de fricção, sintetizadas nas equações lineares obtidas, facilitam bastante a visualização do “peso” de cada variável sobre os valores-alvo e, conseqüentemente, a determinação das ações mais adequadas para o restabelecimento dos valores desejados para espessura de saída da tira ( $h_2$ ) e área da região de entrada da

colina de fricção ( $cf_1$ ), ou seja, as informações que tais equações serão primordiais na elaboração das regras de controle.

Muniz [4] propõe uma seqüência de passes estipulada de forma empírica, utilizando novamente como ferramenta de apoio, o aplicativo Lamina Pro 1.0. A seqüência de passes proposta produz uma redução de espessura gradativa da tira à medida que a mesma passa pelas 3 cadeiras do laminador proposto. A redução total de espessura da tira,  $\Delta h_T$  (diferença entre a espessura da tira na entrada da primeira cadeira,  $h_{11}$ , e a sua espessura na saída da terceira cadeira,  $h_{23}$ ) é dividida entre as cadeiras da seguinte forma : redução de 50% de  $\Delta h_T$  na primeira cadeira, 35% na segunda cadeira e de 15% de redução de  $\Delta h_T$  na terceira cadeira (reforça-se que estes valores percentuais foram escolhidos empiricamente) provendo assim, uma condição inicial adequada para o controle do laminador, como bem ilustra o exemplo da seqüência de passes para laminação a quente que segue (TABELA 3).

Tabela 3 – Exemplo de uma sequência de passes definida para laminação a quente (redução de espessura da tira de 10mm para 4mm)

DADOS COMUNS					
<b>W<sub>1,1</sub> = 500 mm</b>			<b>temp = 900°C</b>		
<b>y<sub>t</sub> = y<sub>c</sub> = 21000 kgf/mm<sup>2</sup></b>			<b>p<sub>t</sub> = p<sub>c</sub> = 0,305</b>		
<b>d<sub>cil</sub> = 200 mm</b>			<b>t<sub>1,i</sub> = t<sub>2,i</sub> = 5 kgf/mm<sup>2</sup></b>		
<b>vl<sub>1</sub> = 50 m/min</b>			<b>E<sub>LMN</sub> = 500 tf/mm</b>		
REDUÇÕES					
Stand 1		Stand 2		Stand 3	
<b>10,0 → 7,0 mm</b>		<b>7,0 → 4,9 mm</b>		<b>4,9 → 4,0 mm</b>	
<b>(cf<sub>1,1</sub> = 3,09 [kgf.rad /mm<sup>2</sup>])</b>		<b>(cf<sub>1,2</sub> = 2,68 [kgf.rad /mm<sup>2</sup>])</b>		<b>(cf<sub>1,3</sub> = 1,51 [kgf.rad /mm<sup>2</sup>])</b>	
P <sub>1</sub> (tf)	M <sub>1</sub> (N.m)	P <sub>2</sub> (tf)	M <sub>2</sub> (N.m)	P <sub>3</sub> (tf)	M <sub>3</sub> (N.m)
<b>231,28</b>	<b>1834,93</b>	<b>212,26</b>	<b>1389,13</b>	<b>133,63</b>	<b>547,47</b>

Este exemplo de sequência de passes para laminação a quente será utilizado para definir os set points de operação do processo de laminação que será simulado neste trabalho

As equações linearizadas do laminador obtidas a partir do método da regressão linear múltipla (Muniz [4]) utilizando como base a sequência de passes definida para laminação a quente, citada anteriormente, são expressas no conjunto de equações abaixo

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 521,617 + 240,523.\mu + 40,305.h_1 - 0,799.t_1 - 0,764.t_2 + 0,360.vl - 0,491.S - 47,469.g \end{array} \right. \quad (4.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 2793,5 + 1230,5.\mu + 609,6.h_1 - 7,9.t_1 + 7,0.t_2 + 2,5.vl - 3,5.S - 657,8.g \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h_2 = 1,043 + 0,481.\mu + 0,081.h_1 - 0,002.t_1 - 0,002.t_2 + 0,001.vl - 0,001.S + 0,905.g \end{array} \right. \quad (4.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} cf_i = 6,999 - 1,715.\mu + 0,686.h_1 + 0,002.t_1 - 0,017.t_2 + 0,005.vl - 0,006.S - 0,777.g \end{array} \right. \quad (4.8)$$

Estas equações linearizadas serão de muita valia para a definição das estratégias de controle, visto que agora os parâmetros,  $\mu$  e  $h_1$ , podem ser estimados com um mínimo esforço computacional tornando possível o controle do processo em tempo real.

Outra utilidade do conjunto de equações linearizadas está na facilidade de determinação da interação entre as variáveis do processo de laminação, podendo ser claramente definida a influência de cada parâmetro operacional nos valores chaves do processo: Carga (P), Torque (M), Espessura de Saída ( $h_2$ ) e Área sob a colina de fricção ( $cf_1$ ).

#### **4.2 - Arvore de interações entre parâmetros operacionais:**

Como o objetivo deste trabalho não é definir uma estratégia de controle para o laminador em questão e sim verificar a viabilidade de utilização de uma rede de comunicação para o tráfego de mensagens do processo, não será aprofundado nesta seção a análise de regras de controle.

O que é de suma importância para definição das mensagens de controle da rede em questão é a análise de interação dos parâmetros operacionais do processo entre as cadeiras do laminador.

Através da interação entre os parâmetros operacionais de cada cadeira do laminador será definida a estrutura e o conteúdo das mensagens da rede de comunicação e controle do processo. Desta forma é possível definir de que

maneira a alteração de um parâmetro operacional de uma das cadeiras de laminação afeta outro parâmetro da mesma cadeira ou de outra adjacente.

A relação entre todas as grandezas manipuladas (parâmetros operacionais) no processo, de cada uma das três cadeiras, pode ser representada em forma de diagrama (Figura 15 – **Árvore de interação entre as**), explicitando a “Árvore de Interações” de cada uma delas, ou seja, mostrando a susceptibilidade dos parâmetros a atuações (ou mesmo distúrbios) em um ou mais deles.

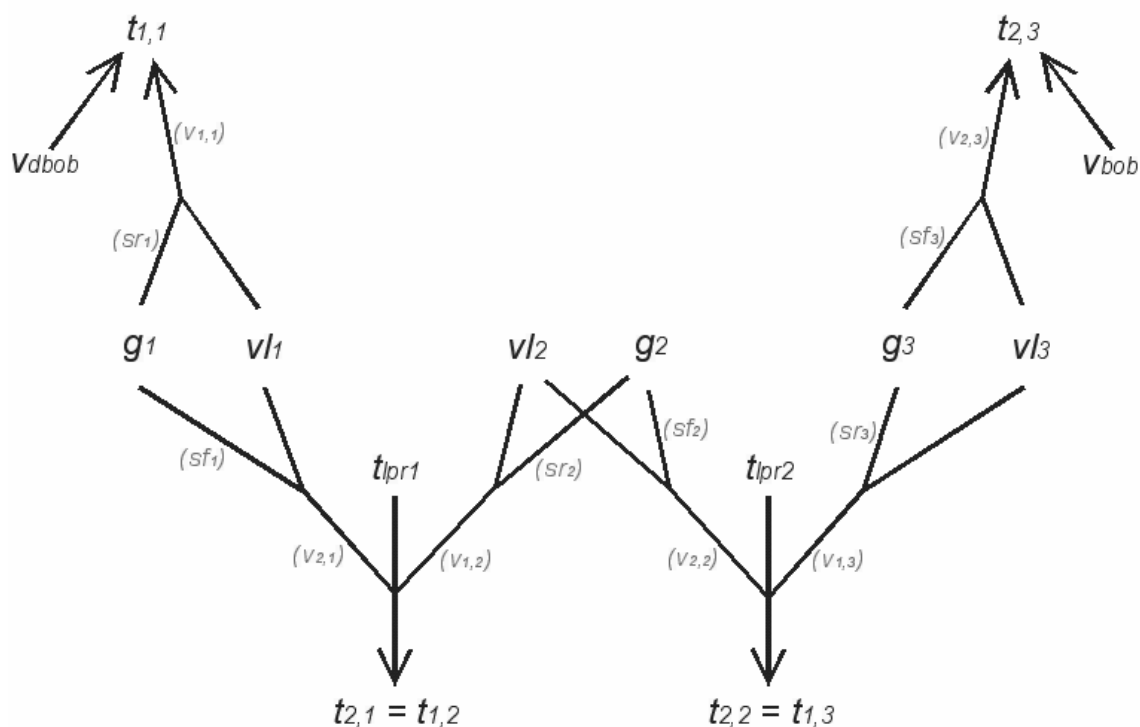


Figura 15 – Árvore de interação entre as variáveis manipuladas do laminador em tandem

Apresenta-se neste diagrama:

$vdbob$   $\equiv$  Velocidade escalar da tira no debobinamento

Vbob	≡ Velocidade escalar de bobinamento da tira
v1,i	≡ Velocidade de entrada da tira na cadeira i (i = 1, 2 ou 3)
v2,i	≡ Velocidade de saída da tira da cadeira i
Sri	≡ Escorregamento a ré na cadeira i
sfi	≡ Escorregamento à frente na cadeira i
Tlprj	≡ Tensão imposta pelo looper j (j = 1 ou 2) sobre a tira

A ligação física entre as cadeiras e os demais subsistemas se dá pela própria tira a ser laminada assim, o parâmetro operacional que “interliga” todos os subsistemas não poderia ser outro senão a tensão exercida sobre a tira, como pode ser observado na Figura 15 – **Árvore de interação entre as**.

Deve ser observado que a alteração de um parâmetro operacional em uma cadeira individualmente, inevitavelmente terá reflexo na(s) cadeira(s) adjacente(s) alterando um ou mais de seus parâmetros operacionais, acarretando assim desvios da espessura e da forma da tira em relação aos seus set points definidos pelo operador. Logo, as mensagens contendo valores dos parâmetros operacionais mensurados e estimados no processo, de acordo com a “Árvore de Interação entre parâmetros operacionais”, deverão ser enviadas para todas as cadeiras envolvidas e não apenas para aquela que detectou o distúrbio.

Utilizando as informações advindas da árvore de interação entre os parâmetros operacionais, torna-se possível à definição um conjunto de mensagens que trafegarão entre os nós (controladores) da rede de

comunicação e controle (que serão definidos no capítulo 5) contendo os valores dos parâmetros operacionais e variáveis do processo necessários para a execução de uma estratégia de controle visando à manutenção dos valores de espessura de saída ( $h_2$ ) e área da região de entrada da colina de fricção ( $cf_1$ ), valores-alvo do processo, dentro dos set points definidos pelo operador.

#### **4.3 - Definição das Informações trocadas entre os Controladores da rede:**

Através da árvore de interações e das relações matemáticas entre alguns parâmetros operacionais determina-se qual o conjunto de parâmetros necessários que devem ser enviados para cada cadeira de modo a alimentar os sistemas de equações lineares podendo assim corrigir qualquer distúrbio advindo de qualquer parte do subsistema de laminação.

É notória também a importância da comunicação entre os diversos controladores / supervisores do sistema para viabilizar aquela que é a principal vantagem de um laminador em tandem, no que diz respeito especificamente ao controle deste processo / qualidade do produto: a possibilidade de se corrigir distúrbios, detectados em uma determinada cadeira, em uma ou mais cadeiras posteriores, restabelecendo as especificações requeridas para o produto final.

Basicamente, a rede de comunicação proposta, detalhada no capítulo 5, é composta de um computador de processo (CPSU), onde fica armazenado o modelo matemático do laminador, um conjunto de 3 controladores, um para cada cadeira, responsáveis por gerenciar, cada um, a operação de uma

cadeira de laminação e de seus subsistemas acoplados (debobinadeira, bobinadeira, loopers, etc.) e por fim um microcontrolador local para cada subsistema de laminação (Controlador de gap, velocidade dos cilindros, looper, velocidade da debobinadeira, etc.)

Na tabela abaixo é definido um conjunto de abreviaturas para facilitar a referência aos controladores que fazem parte do sistema da laminação em questão.

Tabela 4 - Abreviaturas dos Controladores/Supervisores

Controlador/Supervisor do Processo	CPSU
Controlador/supervisor da cadeira i	CC <sub>i</sub>
Microcontrolador da velocidade do cilindro e do gap i	$\mu$ CilGap <sub>i</sub>
Microcontrolador do Looper j	$\mu$ CL <sub>i</sub>
Microcontrolador da velocidade da Bobinadeira	$\mu$ CVB
Microcontrolador da velocidade da Debobinadeira	$\mu$ CVD

Onde i => número da cadeira (i= 1, 2 ou 3)

J=> número do looper (j = 1 ou 2)

Para que os controladores das cadeiras possam interagir a fim de manter a espessura e forma da tira nos valores desejados é de suma importância que estes controladores/supervisores recebam informações provenientes dos micro controladores locais, responsáveis pelo controle contínuo do sistema, e também dos controladores das cadeiras adjacentes



Serão definidas a seguir as mensagens que tráfegarão entre os controladores da rede de comunicação.

#### **4.3.1 - Informações trocadas entre os controladores das cadeiras e o computador do processo (CPSU):**

Como já foi citado anteriormente o computador/supervisor do processo (CPSU) contém o modelo matemático do processo, sendo responsável por gerar todos os set points de operação para os subsistemas de laminação. Toda mudança dos parâmetros de laminação, que ocorra durante o processo, necessita ser comunicada ao CPSU para que este possa definir os novos set points de operação para a nova situação do sistema.

Os set points gerados pelo CPSU são enviados para os controladores/supervisores das cadeiras de laminação (CCi's) que através das equações linearizadas de controle, advindas das curvas de sensibilidade, geram os set points de operação dos microcontroladores locais dos subsistemas de laminação responsáveis por manter o sistema dentro dos valores pré-determinados.

As mensagens enviadas do CPSU para os CCi's ,definidas com maiores detalhes no capítulo 5, contém os set points relativos ao gap ( $g_1, g_2$  e  $g_3$ ), velocidade do cilindro ( $v_{l1}, v_{l2}$  e  $v_{l3}$ ) , tensão à frente ( $t_{1,1}, t_{1,2}$  e  $t_{1,3}$ ) e tensão a ré ( $t_{2,1}, t_{2,2}$  e  $t_{2,2}$ ) de cada cadeira de laminação.

Tabela 5 - Informações enviadas do CPSU para os controladores das cadeiras

CPSU → CC1	CPSU → CC 2	CPSU → CC 3
$g_1^*$	$g_2^*$	$g_3^*$
$t_{1,1}^*$	$t_{1,2}^*$	$t_{1,3}^*$
$t_{2,1}^*$	$t_{2,2}^*$	$t_{2,2}^*$
$vl_1^*$	$vl_2^*$	$vl_3^*$

Onde \* = Set point

Além de enviar os set points citados acima o CPSU deve enviar também os coeficientes das equações de controle linearizadas para cada controlador/supervisor das cadeiras. Porém como estes parâmetros serão enviados somente no set up ou quando houver alguma alteração no material a ser laminado, os mesmos terão pouca influência no tráfego das mensagens entre os controladores podendo por isso não serem levados em consideração na determinação das mensagens.

Os controladores/supervisores de cada cadeira de laminação devem enviar um conjunto de informações para o CPSU, organizados em mensagens, contendo dados dos subsistemas associados a cada controlador/supervisor em questão.

O **CC1** gerencia o funcionamento dos subsistemas da debobinadeira e do loop 1 além dos subsistemas de controle de gap, velocidade dos cilindros pertencentes à cadeira citada. As informações enviadas do controlador /supervisor da cadeira 1 para o CPSU são: a carga de laminação medida ( $P_1$ ), o

torque de laminação ( $M_1$ ), o gap ( $g_1$ ), a velocidade do cilindro de laminação ( $vl_1$ ), a tensão de saída da tira entrada e saída da tira ( $t_{1,1}$  e  $t_{2,1}$ , respectivamente) e por fim a velocidade da debobinadeira ( $v_{dbob}$ ).

Os controladores/supervisores das demais cadeiras também enviam informações ao CPSU referentes aos subsistemas gerenciados por eles. Estas informações são detalhadas na tabela abaixo:

Tabela 6 - Informações enviadas dos controladores das cadeiras para o CPSU

CC 1 → CPSU	CC 2 → CPSU	CC 3 → CPSU
$P_1$	$P_2$	$P_3$
$M_1$	$M_2$	$M_3$
$g_1$	$g_2$	$g_3$
$vl_1$	$vl_2$	$vl_3$
$t_{1,1}$	$t_{2,2}$	$t_{2,3}$
$t_{2,1}$		$v_{bob}$
$v_{dbob}$		

#### **4.3.2 - Informações trocadas entre os controladores das cadeiras:**

As informações trocadas entre os controladores de cada cadeira estão diretamente relacionadas aos parâmetros da tira a ser laminada. O controlador

da cadeira 2 precisa saber qual a espessura ( $h_{2,1}$ ), a velocidade ( $v_{2,1}$ ), a tensão de escoamento ( $S_{0,2}$ ) e a tensão de saída de tira quando esta deixa a cadeira 1 para que possa determinar os set points dos controladores sob sua supervisão (controladores locais) de modo a gerar a redução de espessura desejada, informada pela CPSU. Do mesmo modo a cadeira 3 necessita destas mesma informações porém referentes à cadeira 2. Além do fluxo de informações se darem no sentido da laminação faz necessário também que as informações se dêem no sentido contrário do fluxo do material de modo a restabelecer as condições normais de funcionamento das cadeiras anteriores ao distúrbio.

Faz-se, portanto, necessária à comunicação em ambos os sentidos, informando prontamente as cadeiras adjacentes, seja a posterior ou aquela que a precede, sobre desvios e/ou ações de controle que as afetam, para que os seus respectivos controladores tomem suas providências localmente, absorvendo as modificações impostas, sempre que possível, evitando propagá-las.

As informações que são enviadas para o CC2 pelo CC3 são: a velocidade de entrada ( $V_{1,3}$ ) e a tensão da tira na entrada da cadeira 3 ( $t_{1,3}$ ). Do mesmo modo o CC1 recebe estas informações, porém advindas do CC2, ou seja, recebe os dados: velocidade de entrada ( $v_{1,2}$ ) e tensão da tira na entrada da cadeira 2 ( $t_{1,2}$ ).

#### **4.3.3 - Informações trocadas entre os controladores das cadeiras e os controladores locais dos subsistemas:**

. Toda comunicação se dará entre os controladores locais de cada subsistema e o seu respectivo controlador/supervisor. Não existirá troca de informações entre os controladores locais de cada subsistema. Por exemplo: o controlador local do subsistema de controle de velocidade da debobinadeira enviará dados somente para o controlador/supervisor da cadeira 1, responsável por gerenciar este subsistema.

Os controladores locais sob supervisão do CC1, CC2 e CC3 estão mostrados respectivamente nas figuras 18, 19 e 20 respectivamente.

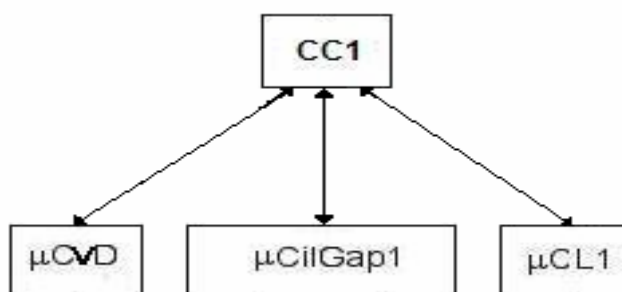


Figura 16 – Subsistemas supervisionados pelo controlador da cadeira 1.

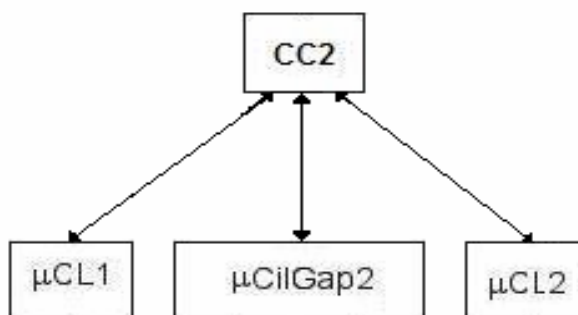


Figura 17 – Subsistemas supervisionados pelo controlador da cadeira 2.

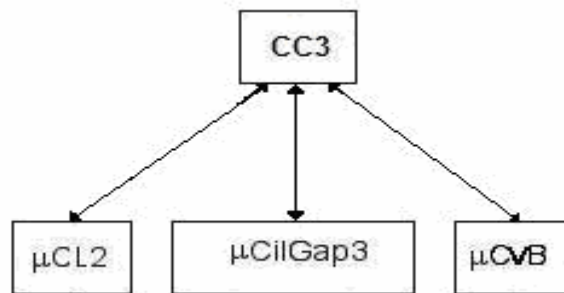


Figura 18 - Subsistemas supervisionados pelo controlador da cadeira 3.

Como foi descrito anteriormente o único subsistema que irá se comunicar com dois controladores/supervisores será o subsistema do loop, tanto o que se encontra entre as cadeiras 1 e 2 quanto o que se localiza entre as cadeiras 2 e 3. Esta comunicação ocorre devido à relevância das informações geradas pelos loops e pela sua importância no processo de controle para ambos os controladores/supervisores das cadeiras adjacentes já citadas.

As tabelas abaixo relacionam as informações trocadas entre os microcontroladores locais dos subsistemas e os seus respectivos CCI's.

Tabela 7 - Informações trocadas entre o CC1 e os  $\mu$ Locais sob sua supervisão

CC1= $\Rightarrow$ $\mu$ Locais	CC1= $\Rightarrow$ $\mu$ CVD $t_{1,1}^*$ $d_{cil,1}$ $h_{1,1}$	CC1= $\Rightarrow$ $\mu$ CilGap <sub>1</sub> $g_1^*$ $vl_1^*$ $d_{cil,1}$ $h_{1,1}$	CC1 $\Rightarrow$ $\mu$ CL <sub>1</sub> $t_{2,1}^*$ $y_t$
$\mu$ Locais= $\Rightarrow$ CC1	$\mu$ CVD= $\Rightarrow$ CC1 $t_{1,1}$ $v_{dbob}$	$\mu$ CilGap <sub>1</sub> = $\Rightarrow$ CC1 $g_1$ $P_1$ $vl_1$ $M_1$	$\mu$ CL <sub>1</sub> = $\Rightarrow$ CC1 $ylpr1$ $t_{2,1}$

Tabela 8 - Informações trocadas entre o CC2 e os  $\mu$ Locais sob sua supervisão

CC2= $\Rightarrow$ $\mu$ Locais	CC2= $\Rightarrow$ $\mu$ CL <sub>1</sub> $t_{1,2}^*$	CC2= $\Rightarrow$ $\mu$ CilGap <sub>2</sub> $g_2^*$ $vl_2^*$ $d_{cil,2}$ $h_{1,2}$	CC2 $\Rightarrow$ $\mu$ CL <sub>2</sub> $t_{2,2}^*$ $y_t$
$\mu$ Locais= $\Rightarrow$ CC2	$\mu$ CL <sub>1</sub> = $\Rightarrow$ CC2 $t_{1,1}$	$\mu$ CilGap <sub>2</sub> = $\Rightarrow$ CC2 $g_2$ $P_2$ $vl_2$ $M_2$	$\mu$ CL <sub>2</sub> = $\Rightarrow$ CC2 $ylpr2$ $t_{2,2}$

Tabela 9 - Informações trocadas entre o CC2 e os  $\mu$ Locais sob sua supervisão

CC3= $\Rightarrow$ $\mu$ Locais	CC3= $\Rightarrow$ $\mu$ CL <sub>2</sub>  $t_{1,3}^*$	CC3= $\Rightarrow$ $\mu$ CilGap <sub>3</sub>  $g_3^*$ $vl_3^*$ $d_{cil,3}$ $h_{2,3}$	CC3 $\Rightarrow$ $\mu$ CVB  $t_{2,3}^*$ $d_{cil,3}$ $h_{2,3}$
	$\mu$ CL <sub>2</sub> $\Rightarrow$ CC3  $y_{lpr2}$ $t_{1,3} (=t_{2,2})$	$\mu$ CilGap <sub>3</sub> $\Rightarrow$ CC3  $g_3$ $P_3$ $vl_3$ $M_3$	$\mu$ CVB $\Rightarrow$ CC3  $t_{2,3}$ $v_{bob}$

Onde \* = Set point

Há informações que são passadas dos CCI's para o setup dos micro controladores locais dos subsistemas, são elas: diâmetro do cilindro de trabalho -  $d_{cil,i}$  (dos CCI's para os  $\mu$ CVCi's), espessura inicial –  $h_{1,1}$  (CC1 para  $\mu$ CVD) e final estimada da tira –  $h_{2,3}$  (CC3 para  $\mu$ CVB), e módulo de Young da tira  $y_t$  (CC2 para  $\mu$ CLj's).

Para gerenciar e organizar o tráfego destas informações no sistema de laminação se faz necessário à adoção de um protocolo de comunicação que seja simples, seguro e eficaz. O protocolo de comunicação adotado e a



topologia física e lógica da rede proposta serão objetos do próximo capítulo deste trabalho.

## **5 - Rede de Comunicação – Protocolo CAN**

O protocolo de comunicação escolhido para gerenciar o tráfego de informações entre os controladores que compõe o sistema de controle distribuído do laminador de tiras em tandem proposto (detalhado na seção 5.3) é o protocolo de comunicação CAN. O protocolo CAN (*Control Area Network*) é um protocolo de comunicação serial síncrono que apresenta vantagens em termos de simplificação do cabeamento (custo, confiabilidade, redução da necessidade de manutenção), flexibilidade (facilidade de implementação de modificações na estrutura da rede), velocidade de comunicação atendendo a requisitos de tempo real do sistema, facilidades para acesso aos diversos nós da rede remotamente (monitorando, alterando dados e diagnosticando falhas), entre outras.

### **5.1 - Introdução ao Protocolo CAN:**

O protocolo CAN foi concebido no início dos anos 80 pela Bosch, que alguns anos mais tarde cooperou com a Intel no aprimoramento do mesmo e na sua adaptação aos circuitos integrados. Desde então a popularidade da CAN cresceu vertiginosamente, e, inicialmente direcionada para aplicações em automóveis (Mercedes, BMW, Porsche, Jaguar, entre outras), já acompanha diversos produtos dos principais fabricantes de semicondutores do mercado, para as mais diversas aplicações industriais.

Versatilidade, alta desempenho, baixo custo (popularização da tecnologia / ganho de escala), confiabilidade/robustez e simplicidade (software, hardware e

sua própria concepção) são algumas das qualidades da CAN que justificam a sua indicação para o sistema de controle distribuído (controladores “independentes”, cada qual com sua própria programação e interface com sensores e atuadores, trocando dados através de uma rede de comunicação) do laminador em questão.

Suas características principais (detalhadas por Lawrenz [10]) – e, posteriormente (Seção 5.2), uma topologia proposta para a rede nesta aplicação e o seu fluxo dos dados (variáveis) – serão discutidas.

## **5.2 - Descrição do Protocolo CAN:**

Cada uma das Unidades Eletrônicas de Controle / nós (também chamadas de ECU's (*Electronic Control Unit*) – Figura 19.a) participantes da rede são compostas, além do microprocessador, da memória e da interface de entradas e saídas (I/O), por um controlador CAN (Figura 19.b), com suas caixas de mensagens (que contém os dados que trafegam pela rede – Figura 19.c), e por um transdutor de interface destas com o meio físico da rede de comunicação.

Do ponto de vista do micro-controlador, a interface de comunicação é simplesmente um conjunto de caixas de mensagens, que são registradores servindo de elo entre o controlador local e os demais nós da rede.

No entanto, para configurar a comunicação (inicialização) entre os diversos nós da rede, deve-se parametrizar o registrador interno do controlador CAN

(características do driver da rede; taxa de transmissão; interrupções; etc.) e inicializar suas caixas de mensagem (nome pelo qual o processador e a rede identificarão cada uma das mensagens; caixas utilizadas para transmissão ou recepção; status inicial; etc.).

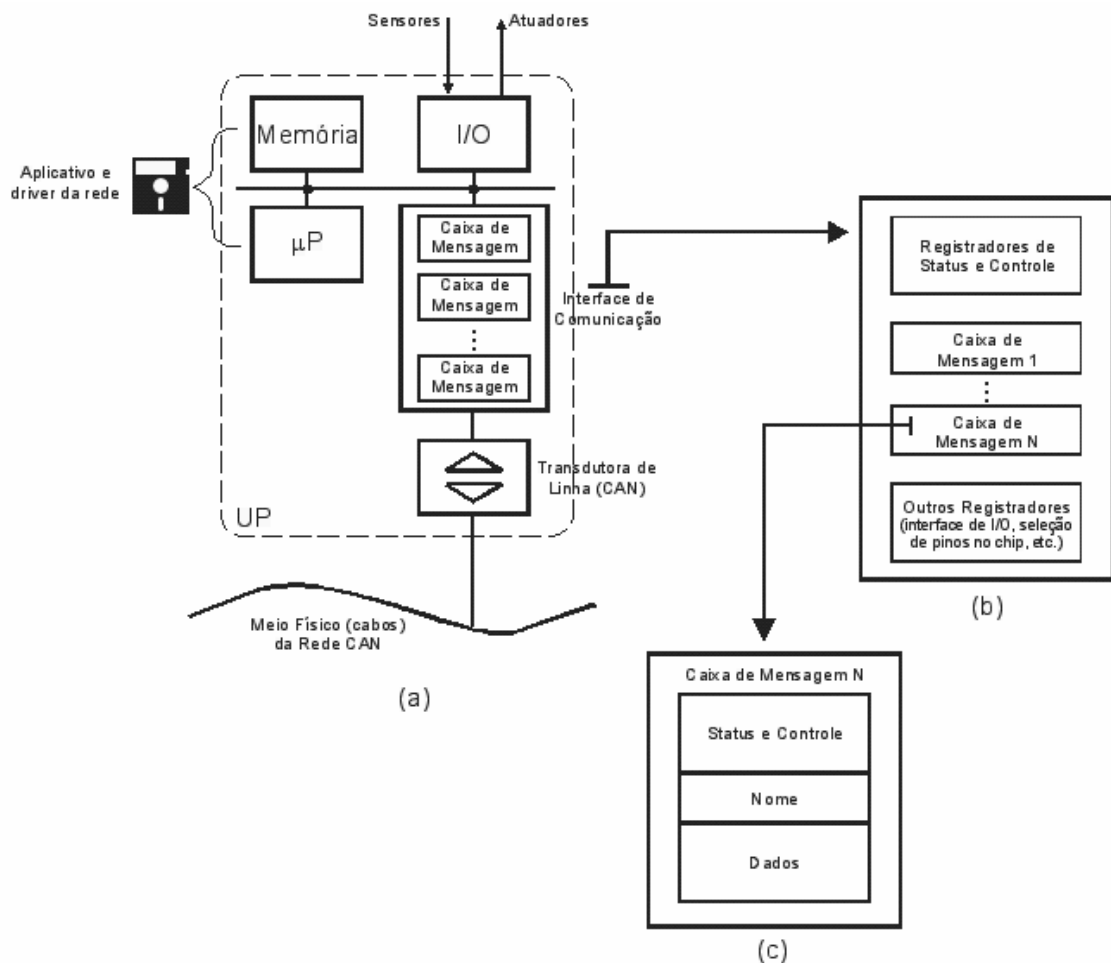


Figura 19 – Blocos internos de uma (a) unidade de processamento, destacando o (b) controlador CAN e suas (c) caixas de mensagem

Há duas formas de se realizar uma comunicação pela rede CAN: uma é determinada pelo produtor da informação (na CAN, cada uma das mensagens, e obviamente cada variável do processo, só é produzida por um único nó, ou seja, dois nós distintos de uma rede não podem produzir uma mesma mensagem / mesmas variáveis), que, quando tem algum dado novo, o envia prontamente pela rede (comunicação iniciada por eventos), para algum consumidor específico ou para todos os demais nós (broadcast), podendo também enviar mensagens em intervalos de tempo pré-definidos; outra forma é a determinada pelo consumidor, que, quando necessita de dados atualizados, envia uma solicitação (RTR - Remote Transmission Request) para o nó produtor, que responderá automaticamente, enviando, assim que possível, os dados solicitados.

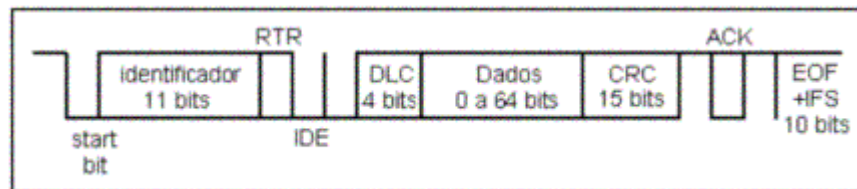
Diante disso, percebe-se ser a CAN uma rede de hierarquia multi-mestre, onde qualquer de seus nós pode comunicar a qualquer momento. O grau de importância / prioridade na rede não é associado aos nós e, sim, às mensagens, cada uma com uma requisição de tempo, um atraso máximo para seu envio, diretamente relacionado à relevância de cada uma delas (melhor dizendo, das variáveis que ela contém) no processo. Assim, mesmo que um nó falhe (ele automaticamente se retira da rede), o sistema não entra em colapso, podendo-se, em contrapartida, ativar um plano de contingência, com os outros nós, visando continuar o processo (garantir disponibilidade) ou abortá-lo com segurança, garantindo a integridade do laminador.

Outra característica fundamental da CAN é a técnica adotada para o controle de acesso ao barramento: a CSMA/CD+CR (Carrier Sense, Multiple Access / Collision Detection + Collision Resolution), similar ao método adotado pela popular Ethernet, com a diferença que as colisões (uma ou mais mensagens com transmissões iniciadas simultaneamente), na CAN, são tratadas levando-se em conta a prioridade de cada mensagem, com um simples, eficiente e não-destrutivo método de arbitragem, não consumindo tempo da rede multi-mestre, interessante para aplicações em tempo real (no entanto, a aplicabilidade da CAN em um determinado processo deve ser avaliada considerando o número de nós, de mensagens e os requisitos de tempo para cada uma delas, com os quais se define a sua prioridade, o que será apresentado na Seção 5.4).

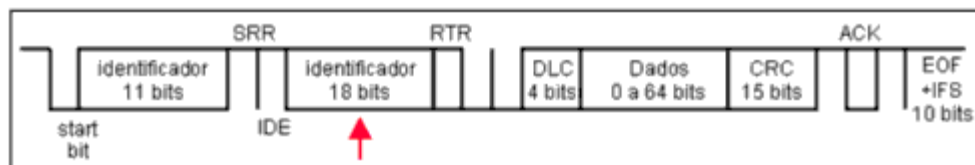
Qualquer nó que deseje acessar o barramento CAN, para iniciar a transmissão de uma mensagem, deve esperar até que o mesmo esteja livre, o que ocorre quando, após o envio e a recepção bem sucedida de uma determinada mensagem, uma interrupção (bit inicial) é produzida, em um mesmo instante, em todos os nós integrantes da rede, sincronizando seus relógios internos (o que é primordial para sistemas de controle distribuído e em tempo real).

Após a emissão deste bit inicial (sincronização), os interessados no envio de dados transmitem os bits de identificação de mensagens, sobre os quais se destaca:

- a quantidade: 29 bits para a CAN Estendida (são 11 para a CAN Padrão), permitindo o endereçamento de até 229 mensagens na rede;



(a)



(b)

Figura 20 - Formato das mensagens – Can Padrão (a) e Can estendida(B)

- a sua função principal: cada mensagem tem uma combinação única destes bits (ID's), sendo esta sua identidade, que é definida de acordo com a prioridade de cada uma delas. Como o controle do barramento considera o '0' dominante e o '1' recessivo, a mensagem de maior prioridade deve ter em seu campo de identificação todos os bits '0' para conquistar o barramento sempre que o estiver disputando com outra mensagem. Se uma ou mais mensagens iniciam a transmissão simultaneamente (colisão), permanecem aquelas que enviam um bit '0' enquanto as demais enviam um bit '1', e assim por diante até que reste apenas uma mensagem, a de maior

prioridade (FIGURA 23). As demais devem aguardar até que o barramento fique livre novamente, iniciando mais um processo de arbitragem;

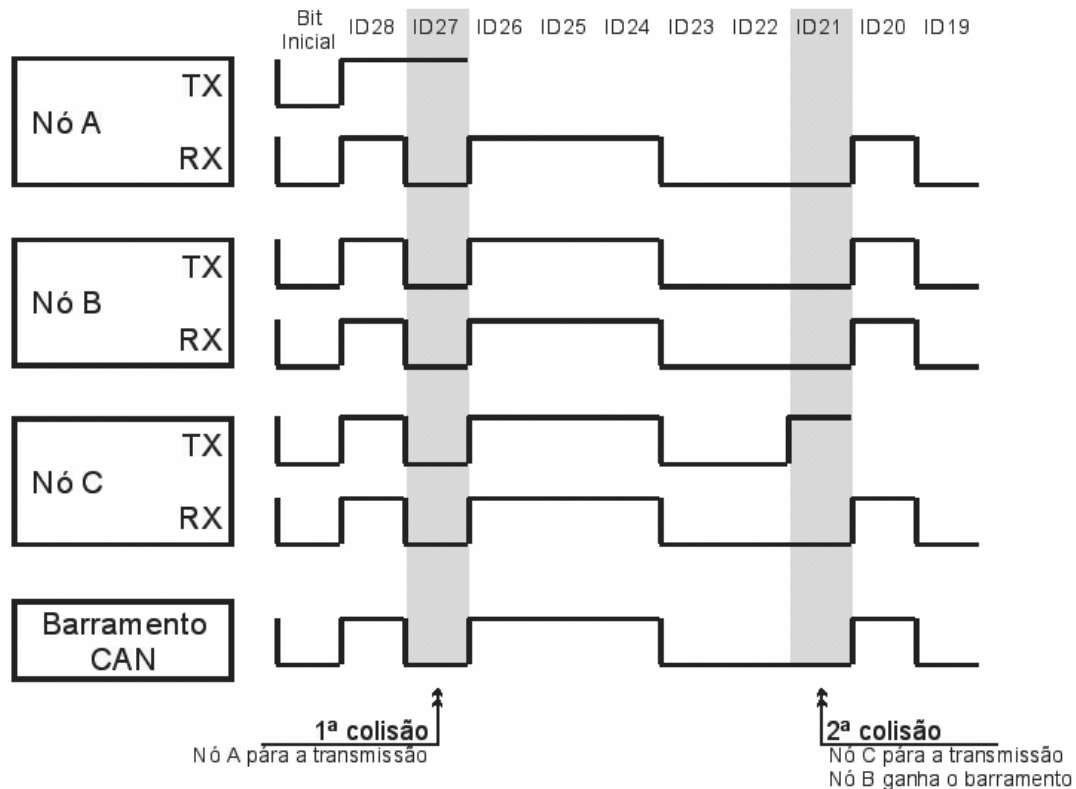


Figura 21 – Exemplo para ilustrar o processo de arbitragem na CAN

- uma outra função: é inimaginável uma aplicação, utilizando uma rede CAN para comunicação, com as centenas de milhões de mensagens que esta rede é capaz de endereçar, logo, é natural que se utilize apenas uma parte dos bits de identificação para efetivamente identificar as mensagens. Uma rede com 200 mensagens, por exemplo, utiliza apenas 8 destes bits. Uma utilização interessante para os bits restantes é associar cada um deles a um nó da rede (no caso do exemplo anterior, poder-se-ia mapear até 21 nós nas mensagens da rede, e aí está a vantagem da CAN Estendida sobre a Padrão, na qual se poderia identificar apenas 3 nós), possibilitando especificar tanto a origem quanto o(s) destino(s) da mensagem, o que,



através de simples rotinas em cada nó (cria-se máscaras para tais bits que são disponibilizados ao barramento logo após os bits que identificam a mensagem; estes, por sua vez, devem precedê-los por estarem associados à prioridade e, conseqüentemente, à conquista do barramento), facilita a captura, por aqueles a quem a mensagem é endereçada, e o descarte da mesma pelos demais, ou seja, ainda que na CAN a mensagem seja disponibilizada no barramento a todos os nós da rede, apenas aqueles para os quais a mensagem é realmente útil, “listados” nesta segunda partição do campo de identificação de mensagens, processarão seus dados.

Após este campo de identificação, transmite-se o restante da mensagem, composta de: 1 bit de RTR (usado por um receptor para solicitar uma mensagem de um determinado transmissor, e que indica que a mensagem não contém nenhum dado); 6 bits de controle; de 0 a 8 bytes (64 bits) de dados; 16 bits de CRC (Cyclic Redundancy Check, eficiente técnica de detecção de bits incorretos na mensagem, com a qual se checa a integridade da mensagem recebida que, por alguma falha do sistema, pode diferir da enviada); 2 bits que atestam ao transmissor da mensagem que ela foi recebida corretamente (Acknowledge) por, pelo menos, um dos nós da rede, servindo para confirmar se o próprio nó que transmite a mensagem ainda está conectado ao barramento; e, finalmente, 7 bits de encerramento da mensagem e 3 de espaçamento entre esta e a próxima a ser transmitida (é o tempo necessário para os controladores CAN armazenarem a informação recém recebida e se prepararem para receber ou enviar uma nova mensagem).

Algumas das maiores vantagens do CAN é a sua robustez e a capacidade de se adaptar às condições de falha, temporárias e/ou permanentes. As falhas de uma rede CAN podem ser classificadas em três categorias ou níveis: Nível de Bit, Nível de Mensagem e Nível Físico.

**Nível de Bit** – Possui dois tipos de erro possíveis:

***Bit Monitoring:*** Após a escrita de um bit dominante, o módulo transmissor verifica o estado do barramento. Se o bit lido for recessivo, significará que existe um erro no barramento.

***Bit Stuffing:*** Apenas cinco bits consecutivos podem ter o mesmo valor (dominante ou recessivo). Caso seja necessário transmitir seqüencialmente seis ou mais bits de mesmo valor, o módulo transmissor inserirá, imediatamente após cada grupo de cinco bits consecutivos iguais, um bit de valor contrário. O módulo receptor ficará encarregado de, durante a leitura, retirar este bit, chamado de Stuff Bit. Caso uma mensagem seja recebida com pelo menos seis bits consecutivos iguais, algo de errado terá ocorrido no barramento.

**Nível de Mensagem** – São três os tipos de erro possíveis:

***CRC ou Cyclic Redundancy Check:*** Funciona como um checksum. O módulo transmissor calcula um valor em função dos bits da mensagem e o

transmite juntamente com ela. Os módulos receptores recalculam este CRC e verificam se este é igual ao transmitido com a mensagem.

**Frame Check:** Os módulos receptores analisam o conteúdo de alguns bits da mensagem recebida. Estes bits (seus valores) não mudam de mensagem para mensagem e são determinados pelo padrão CAN.

**Acknowledgment Error Check:** Os módulos receptores respondem a cada mensagem íntegra recebida, escrevendo um bit dominante no campo ACK de uma mensagem resposta que é enviada ao módulo transmissor. Caso esta mensagem resposta não seja recebida (pelo transmissor original da mensagem), significará que, ou a mensagem de dados transmitida estava corrompida, ou nenhum módulo a recebeu.

Toda e qualquer falha acima mencionada, quando detectada por um ou mais módulos receptores, farão com que estes coloquem uma mensagem de erro no barramento, avisando toda a rede de que aquela mensagem continha um erro e que o transmissor deverá reenviá-la.

Além disso, a cada mensagem erroneamente transmitida ou recebida, um contador de erros é incrementado em uma unidade nos módulos receptores, e em oito unidades no transmissor. Módulos com estes contadores iguais a zero são considerados Normais. Para os casos em que os contadores contêm valores entre 1 e 127, os módulos são considerados Error Active. Contadores contendo valores entre 128 e 255 colocam os módulos em condição de Error

Passive. Finalmente, para contadores contendo valores superiores a 255, os módulos serão considerados em Bus Off e passarão a não mais atuar no barramento. Estes contadores também são decrementados à medida que mensagens corretas são recebidas, o que reduz o grau de incerteza em relação à atividade dos módulos ora com contadores contendo valores diferentes de zero e possibilita novamente a plena participação deles no barramento.

**Nível Físico** – Para os barramentos, caso algo de errado venha a ocorrer com os fios da rede de dados, a rede continuará operando sob uma espécie de modo de segurança. Seguem abaixo algumas das condições de falha nas linhas de comunicação que permitem a continuidade das atividades da rede:

- Curto do rede CAN para GND (ou VCC);
- Curto entre os fios da rede de dados ;
- Ruptura da rede CAN;

Se em uma transferência qualquer, pelo menos um dos nós detectar um erro enquanto receptor de mensagem, este(s) nó(s) emite(m) uma mensagem de erro que, para o nó transmissor da mensagem, significa uma solicitação de retransmissão da informação, e, para os demais nós, significa o descarte da última mensagem recebida. Isto garante a consistência do sistema, impossibilitando que controladores distintos trabalhem com valores diferentes de uma mesma variável do processo.

Os bits na CAN têm codificação NRZ (sem retorno a zero – FIGURA 23), que apesar de requerer uma menor largura de banda, apresenta a desvantagem de dificultar a sincronização entre os nós da rede durante a transmissão de uma mensagem. Por esta razão, utiliza-se um método de inserção de um bit (chamado Bit Stuffing) na mensagem sempre que há uma sequência de 5 bits idênticos, sendo, aquele bit, complementar aos bits desta sequência (se a sequência é de zeros, insere-se um bit '1', e vice-versa). Os receptores das mensagens removem os bits inseridos antes de enviar a informação para os seus processadores.

Uma grande vantagem da CAN, principalmente em se tratando de uma rede para aplicações industriais, é a sua alta imunidade a ruído, quando adotado o modo diferencial, que vem a ser a utilização de 02 (duas) linhas de comunicação com sinais complementares, isto é, a diferença entre os sinais de ambas as linhas, que, estando os cabos fisicamente juntos, estariam sujeitas às mesmas interferências, determina o valor lógico do bit ('1' ou '0').

E, finalmente, um último ponto importante a ser mencionado é que, devido à limitação de velocidade de propagação de um sinal no cobre e pela própria concepção do protocolo CAN, existe um compromisso entre a taxa de transmissão da rede ( $\sigma$ ) e o comprimento do seu cabeamento ( $L_c$ ), cuja relação é dada pela equação 5.X.

$$L_c \cdot \sigma < 40[\text{metros}] \cdot 1\text{M}[\text{bps}] \quad (5.X)$$

Ou seja, a máxima taxa de transmissão da rede CAN (1Mbps) só seria aplicável em barramentos de comprimento inferior a 40 metros, enquanto que se um barramento tem 200 metros, por exemplo, a taxa de transmissão máxima para esta rede seria de 200 kbps.

Este, porém, é apenas um ponto de partida para a definição da taxa de transmissão de uma rede, devendo-se analisá-la principalmente quanto às mensagens que a compõe (quantidade, tamanho, grau de importância / prioridade e requisitos de tempo – atraso máximo permitido para o envio de determinada mensagem e a periodicidade ou condição para este envio), pois, caso tal taxa não atenda à meta de tempo estipulada para troca destas informações ou a uma utilização adequada do barramento serial (minimizando riscos de sobrecarga), ela deve ser reduzida gradativamente até que se atinjam tais parâmetros.

A topologia física e lógica da rede proposta para gerenciar o sistema do laminador de três cadeiras em tandem será praticamente a mesma utilizada em Muniz [ ] porém com algumas considerações e adaptações levando em conta algumas restrições do simulador adotado.

### **5.3 Definição da Rede**

A topologia física para a rede de comunicação e controle adotada segue a mesma linha da topologia proposta em Muniz [ ] porém com algumas modificações por conta da limitação de nós (4 nós) imposta pelo simulador adotado (versão de demonstração – detalhado no capítulo 6) .

A rede de comunicação e controle proposta por Muniz [4] é composta por duas sub-redes: a Can1 e a Can2. A rede Can1 possui 4 nós e é responsável pelo tráfego de informações entre o Computador de Processo (CPSU) e os controladores das cadeiras de laminação (CC1, CC2 e CC3). Já a rede Can2 possui 13 nós e realiza o tráfego de informações entre os controladores locais dos subsistemas de laminação ( $\mu\text{CL}_i$ ,  $\mu\text{CG}_i$ ,  $\mu\text{CVB}_i$ ,  $\mu\text{CVC}_i$ , etc.) e os controladores das cadeiras (CC1, CC2 e CC3).

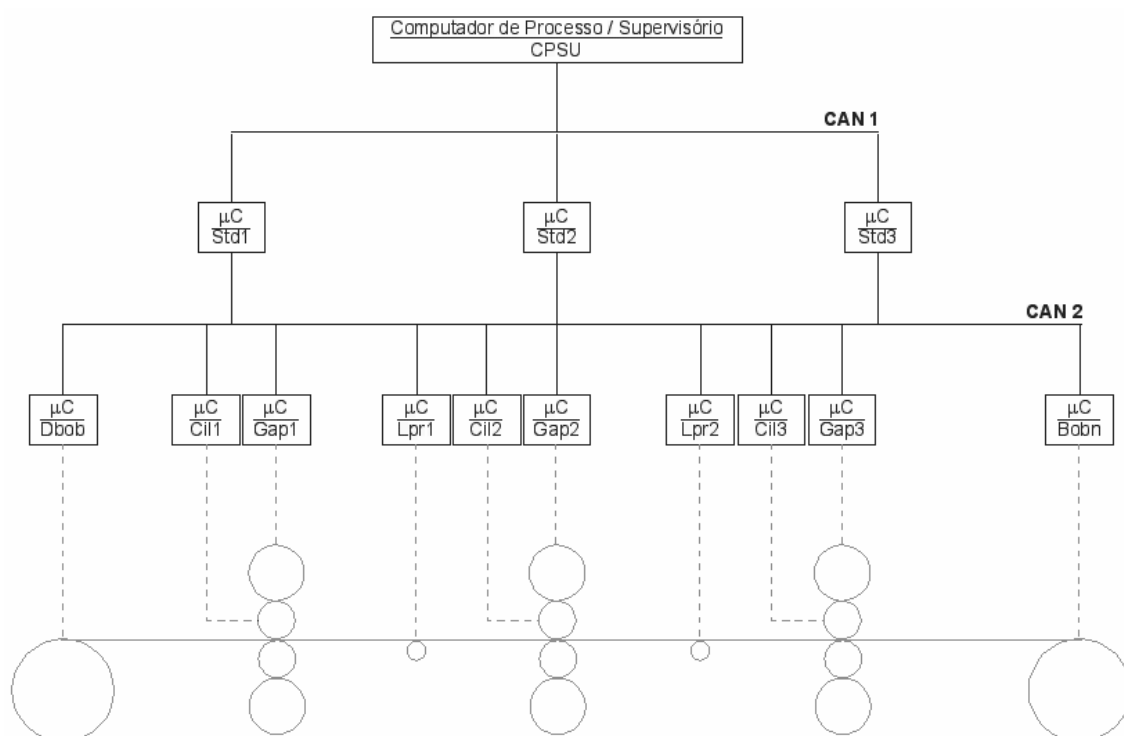


Figura 22 - Rede de comunicação proposta por Muniz [4]

Para que fosse possível a simulação da rede proposta por Muniz foram realizadas algumas modificações na rede de comunicação CAN 2 (responsável por realizar o tráfego de informações entre os controladores locais dos subsistemas de laminação) visto que a mesma possui uma quantidade de nós (13 nós) superior à quantidade máxima permitida pelo simulador utilizado.

Basicamente foram realizadas 2 mudanças:

1º - União do processamento da velocidade do cilindro de trabalho ( $v_{l_i}$ 's) e a medição do gap ( $gap_i$ 's) em um único microprocessador (nó  $\mu\text{CilGap}_i$ ) - mudança já incluída na definição das informações trocadas entre os controladores, realizada no capítulo anterior.

2º - Divisão da rede Can 2 em três sub-redes (Can2 , Can3 e Can4) visto que, não havendo comunicação direta entre os controladores locais dos subsistemas, a rede CAN2 pode ser segmentada em três sub-redes possibilitando assim a simulação de cada uma delas integralmente sem afetar o desempenho da comunicação. Toda a informação gerada pelos controladores locais passa pelos controladores de suas respectivas cadeiras antes de ser repassada para os controladores locais das demais cadeiras através das redes CAN2, CAN3 e CAN4, não havendo portanto tráfego de informações entre controladores locais pelas sub-redes citadas. Cabe lembrar que desta forma todas as redes terão no máximo 4 nós podendo assim ser implementadas no simulador sem restrições.

Os únicos nós que enviarão informações para mais de um controlador de cadeira serão os controladores locais dos loopers ( $\mu\text{CL}_i$ 's) que farão parte tanto da rede CAN2 quanto da rede CAN3, para o caso do controlador local do subsistema de laminação looper 1, e da rede CAN3 e CAN4, para o caso do controlador local do looper 2.



Desta forma cada sub-rede pôde ser simulada separadamente dando uma visão clara do tráfego de informações entre os subsistemas de laminação .

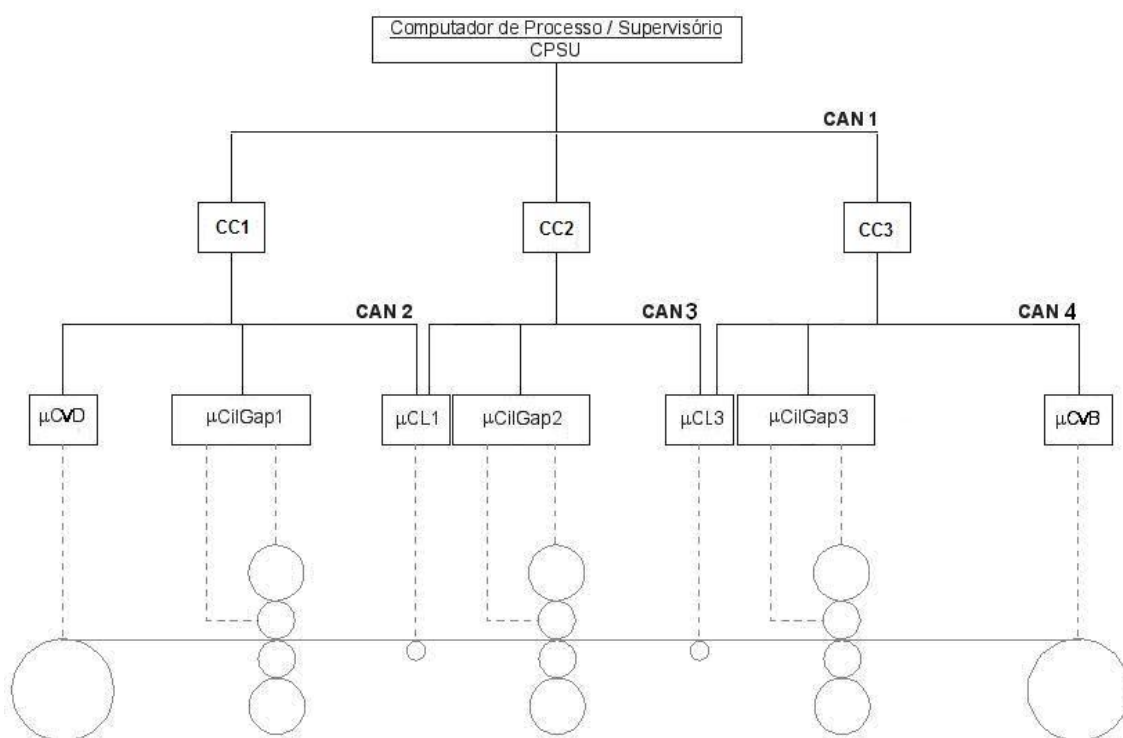


Figura 23 - Proposta para topologia física da rede

### **5.3 Definição das mensagens**

Definida a topologia da rede de comunicação a ser adotada, parte-se para o mapeamento de todos os dados vitais para o processo (mensagens das redes CAN1, CAN2, CAN3 e CAN4).

Deve-se levantar, com muito critério, as diversas mensagens (com no máximo 8 bytes de dados), definindo a origem e o(s) destino(s) de cada uma

delas, objetivando otimizar o funcionamento da rede no que diz respeito ao atendimento dos (rigorosos) requisitos de tempo de disponibilização dos dados para seus consumidores com uma utilização satisfatória do barramento, ou seja, o foco deve estar no tráfego da rede.

Quanto menor for o número de mensagens, menor o nível de prioridades, menor a disputa pelo barramento, menor o atraso no envio de mensagens com menores prioridades, o que possibilita, até, um incremento na taxa de transmissão de dados prevista no projeto desta rede e um ganho considerável no que diz respeito à utilização do barramento, remetendo à confiabilidade da rede em questão. Soma-se a isto o fato de que há uma limitação no número de mensagens suportadas por cada controlador CAN (tipicamente, de 14 a 16 caixas de mensagens).

Assim, ao invés de associar uma mensagem a cada uma das variáveis do processo, utiliza-se a técnica conhecida como “piggy-packing”, reunindo em uma mesma mensagem mais de uma variável, desde que estas tenham a mesma origem. Nos destinos podem-se filtrar os dados que interessam a cada um deles, uma vez que, no protocolo da CAN, conforme já frisado, toda mensagem é disponibilizada para o barramento, que é acessado por todos os nós da rede, ao contrário de outros protocolos de comunicação em que a mensagem é enviada a um destino específico.

E de fato, compensa enviar, por exemplo, três variáveis para três destinos, com cada um filtrando aquela(s) que o interessam (am), do que gerar três

mensagens, uma para cada conexão entre micro-controladores, para enviar apenas uma variável. Isto se deve ao tamanho do cabeçalho do quadro (frame) do protocolo CAN (bit inicial, de identificação, de controle, entre outros), que, no primeiro caso, seria enviado apenas uma vez e, no segundo, três vezes.

O êxito no agrupamento de variáveis, resultando em um melhor desempenho da rede, dependerá fundamentalmente do número de bits associado a cada variável, em virtude da já citada limitação do campo reservado para dados em cada mensagem (8 bytes).

Decidiu-se por padronizar a representação dos diversos valores de variáveis do processo, simplificando as rotinas de conversão de dados, que passam, assim, a ser uma única para todas as unidades de processamento, independente das variáveis enviadas ou recebidas por cada uma delas. Foi analisado o banco de dados contendo os valores das variáveis do processo de laminação a quente para definir qual a quantidade de bits necessários para representar cada variável.

Foram observados os valores máximos e mínimos de cada variável para um set point de operação específico e então definida uma quantidade  $x$  de bits que representasse a variável com a precisão desejada. Optou-se por gerar variáveis com 15 bits, que foi um valor ótimo encontrado levando-se em conta a precisão desejada e a faixa de valores típicos para cada uma das variáveis envolvidas.

As informações trocadas entre os controladores das cadeiras e a CPSU (através da rede CAN1) e entre os controladores das cadeiras e os demais subsistemas (através das redes CAN2, CAN3 e CAN4) foram agrupadas em mensagens de modo que cada mensagem pode transmitir até 4 variáveis ao mesmo tempo (“piggy-packing”) limitando-se a 64 bits (4 mensagens – 60 bits), e tendo cada uma dessas variáveis a mesma origem.

A periodicidade de envio de cada mensagem através da rede, CT, e o atraso máximo permitido para este envio, CD, são definições cruciais para o projeto, intrinsecamente relacionadas com a importância de cada variável no processo e, conseqüentemente, com a prioridade das mensagens que contém tais variáveis na rede CAN. Estes valores de tempo serão utilizados posteriormente para definição teórica e prática da taxa de ocupação de cada rede de comunicação (CAN1, CAN2, CAN3 e CAN4) do sistema de laminação, que é foco deste trabalho.

Estipulam-se, então, empiricamente, os valores de tais intervalos de tempo, suficientes para que se controle adequadamente o laminador (cumprindo as exigências de qualidade para a tira), com os quais se estabelece o desempenho desejado para as redes de comunicação CAN1, CAN2, CAN3 e CAN4, valendo destacar que:

- As mensagens que contém as ações de controle (set-points de tensões, gap e velocidade de laminação) e as variáveis medidas (carga, torque, velocidade de laminação, tensões sobre a tira e a posição atual dos

loopers), que trafegam pela CAN2, CAN3 e CAN4, possuem, para o laminador em questão (para o qual se admite velocidades de até 200m/min), requisitos de tempo (atraso máximo de envio de 5ms) tão rigorosos quanto aos dos sistemas HAGC dos mais modernos trens de laminação de tiras (resposta de 1ms, para laminação a até 1200m/min). Um atraso máximo de 5ms também é exigido para as intervenções do operador do sistema (via CAN1), por estarem associadas diretamente à qualidade final da tira;

- Para as variáveis relacionadas ao controle “feedforward” (fluxo de informação entre cadeiras), apesar da criticidade alta, pode-se permitir um atraso máximo ligeiramente superior (10ms) que, ainda assim, estará muito aquém do tempo de trajeto da fração de material fora das especificações de uma cadeira para outra (1,80s, por exemplo, para que se percorra uma distância de 3m, separando stands adjacentes, a uma velocidade de 100m/min).

A tabela 10 lista as mensagens que trafegam na rede CAN1 e foram criadas de acordo com as tabelas 4 e 5 (capítulo 4) utilizando os conceitos citados anteriormente.

Tabela 10 – Relação das mensagens da rede CAN1

Nome <sup>≡</sup>	Dados	De	Para	Nº de Bytes	Periodicid. de envio, C <sub>T</sub> [ms]	Atraso Máximo, C <sub>D</sub> [ms]
M101	g <sub>1</sub> ; vl <sub>1</sub> ; t <sub>1,1</sub> ; t <sub>2,1</sub> (*)	CPSU	CC1	8	5	5
M102	g <sub>2</sub> ; vl <sub>2</sub> ; t <sub>2,2</sub> (*)	CPSU	CC2	6	5	5
M103	g <sub>3</sub> ; vl <sub>3</sub> ; t <sub>2,3</sub> (*)	CPSU	CC3	6	5	5
M104	P <sub>1</sub> ; M <sub>1</sub> ; g <sub>1</sub> ; vl <sub>1</sub>	CC1	CPSU	8	50	10
M105	t <sub>1,1</sub> ; t <sub>2,1</sub> ; V <sub>dbob</sub>	CC1	CPSU	6	50	10
M106	h <sub>2,1</sub> ; v <sub>2,1</sub> ; S <sub>0,2</sub> ; t <sub>2,1</sub>	CC1	CC2	8	10	10
M107	P <sub>2</sub> ; M <sub>2</sub> ; g <sub>2</sub>	CC2	CPSU	6	50	10
M108	vl <sub>2</sub> ; t <sub>2,2</sub>	CC2	CPSU	4	50	10
M109	v <sub>1,2</sub> ; t <sub>1,2</sub>	CC2	CC1	4	10	10
M110	h <sub>2,2</sub> ; v <sub>2,2</sub> ; S <sub>0,3</sub> ; t <sub>2,2</sub>	CC2	CC3	8	10	10
M111	P <sub>3</sub> ; M <sub>3</sub> ; g <sub>3</sub>	CC3	CPSU	6	50	10
M112	vl <sub>3</sub> ; t <sub>2,3</sub> ; V <sub>bob</sub>	CC3	CPSU	6	50	10
M113	v <sub>1,3</sub> ; t <sub>1,3</sub>	CC3	CC2	4	10	10

As tabelas 10, 11 e 12 listam as mensagens que trafegam nas redes CAN2, CAN3 e CAN4 e foram criadas de acordo com as tabelas 6, 7 e 8 (capítulo 4) .

Tabela 11 – Relação das mensagens da rede CAN2

Nome <sup>≡</sup>	Dados	De	Para	Nº de Bytes	Periodicid. de envio, C <sub>T</sub> [ms]	Atraso Máximo, C <sub>D</sub> [ms]
M201	t <sub>1,1</sub> *	CC1	μCVD	2	5	5
M202	g <sub>1</sub> *, vl <sub>1</sub> *	CC1	μCilGap1	4	5	5
M203	t <sub>1,1</sub> , V <sub>dbob</sub>	μCVD	CC1	4	5	5

M204	$d_{cil,1}; h_{1,1}$	CC1	$\mu CilGap1,$ $\mu CVD$	4	1000	1000
M205	$P_1; g_1; M_1;$ $vl_1$	$\mu CilGap1$	CC1	8	5	5
M206	$t_{2,1}; y_{lpr1}$	$\mu CL1$	CC1	4	5	5
M207	$t_{2,1}^*$	CC1	$\mu CL1$	2	5	5

Tabela 12 – Relação das mensagens da rede CAN3

Nome <sup>≡</sup>	Dados	De	Para	Nº de Bytes	Periodicid. de envio, $C_T$ [ms]	Atraso Máximo, $C_D$ [ms]
M301	$t_{1,2}^*$	CC2	$\mu CL1$	2	5	5
M302	$g_2^*; vl_2^*$	CC2	$\mu CilGap2$	4	5	5
M303	$t_{2,2}; y_{lpr2}$	$\mu CL2$	CC2	4	5	5
M304	$d_{cil,2}; y_t$	CC2	$\mu CilGap2,$ $\mu CL1, \mu CL2$	4	1000	1000
M305	$P_2; g_2; M_2; vl_2$	$\mu CilGap2$	CC2	8	5	5
M306	$t_{1,2}; y_{lpr1}$	$\mu CL1$	CC2	4	5	5
M307	$t_{2,2}^*$	CC2	$\mu CL2$	2	5	5

Tabela 13 – Relação das mensagens da rede CAN4

Nome <sup>≡</sup>	Dados	De	Para	Nº de Bytes	Periodicid. de envio, $C_T$ [ms]	Atraso Máximo, $C_D$ [ms]
M401	$t_{2,3}^*$	CC3	$\mu CVB$	2	5	5
M402	$g_3^*; vl_3^*$	CC3	$\mu CilGap3$	4	5	5
M403	$t_{1,3}^*$	CC3	$\mu CL2$	2	5	5
M404	$d_{cil,3}; h_{2,3}$	CC3	$\mu CilGap3,$ $\mu CVB$	4	1000	1000
M405	$P_3; g_3; M_3; vl_3$	$\mu CilGap3$	CC3	8	5	5
M406	$t_{2,2}; y_{lpr2}$	$\mu CL2$	CC3	4	5	5
M407	$t_{2,3}; v_{bob}$	$\mu CVB$	$\mu CL2$	4	5	5

## 6 -SIMULAÇÃO DA REDE

Como já citado nos capítulos anteriores, para realizar a simulação da rede proposta foi utilizado a versão de demonstração (devido ao alto custo para a aquisição de uma versão completa) de um simulador de redes industriais baseado no protocolo CAN. Este simulador, o CANOE®®, desenvolvido pela Vector, empresa alemã, tem como foco principal possibilitar a simulação de redes de controle e comunicação de sistemas automotivos, porém não é específico para utilização nesta área.

### 6.1 Simulador adotado

O simulador consiste em um conjunto de 4 programas integrados: **Candb++**, **Panel (editor / Generator)**, **CAPL (Browser / Generator / Compiler)** e **CANoe®**. Cada programa é responsável por uma etapa do processo de simulação

Os seguintes programas executáveis fazem parte do simulador CANOE®® utilizado:

#### 6.1.1 - Candb++ – Base de dados.

Todos os dados de comunicação relevantes que são processados no sistema CAN bem como suas inter-relações são usualmente administradas em um banco de dados central de comunicação.



CANdb++ é um programa administrador de dados com o qual esta bases de dados podem ser criadas e modificadas na forma de uma base de dados CAN.

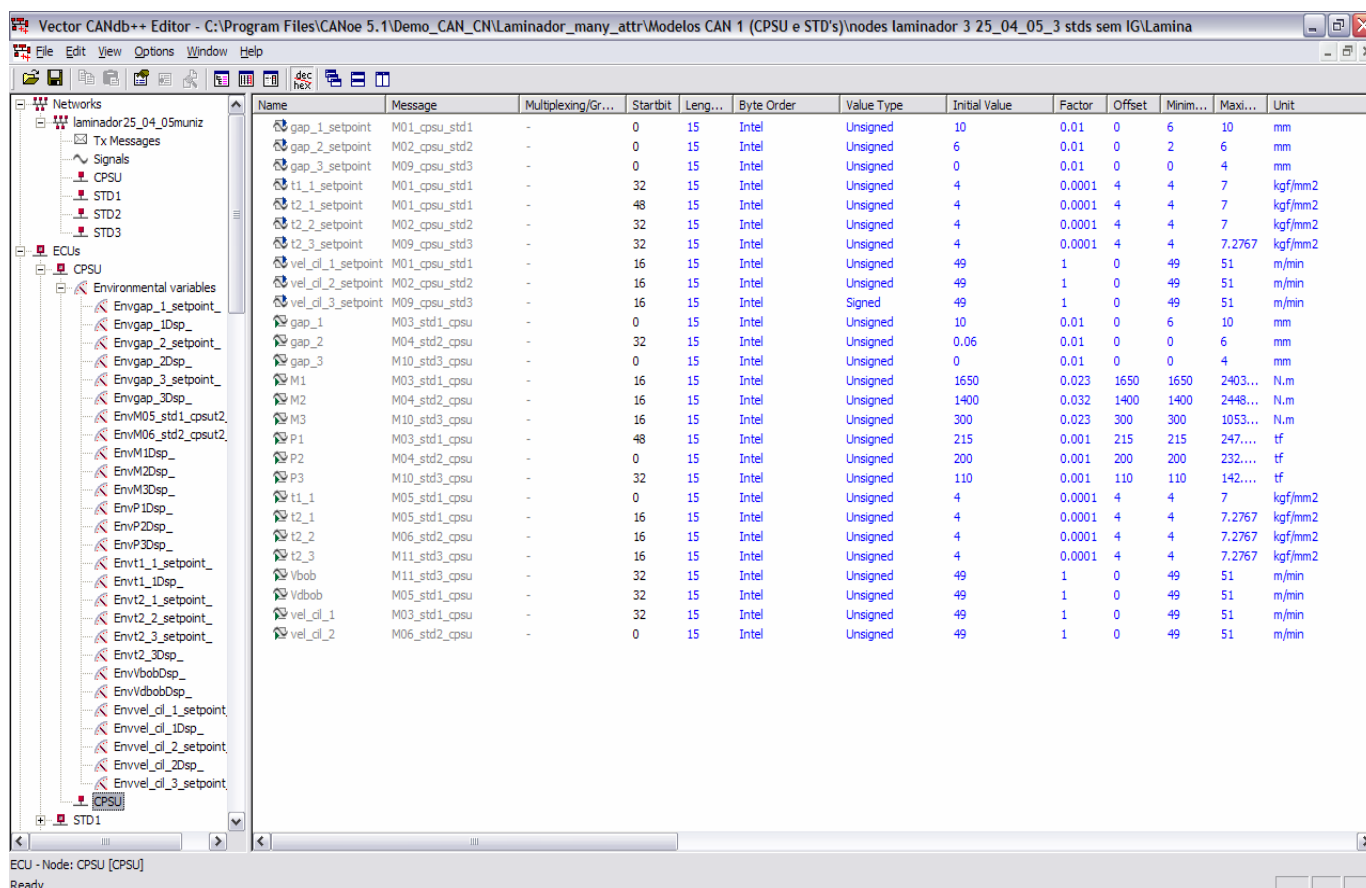


Figura 24 - Tela do CANdb++ - Base de dados da rede CAN 1

**CANdb++ Editor:** Software responsável por criar e modificar a base de dados. Contém a “alma” do sistema a ser simulado. Algumas definições primordiais para o entendimento do sistema de base de dados utilizadas na simulação serão expostas a seguir:

**Mensagens:** São criadas de acordo com os sinais pertencentes ao processo. Pode conter um ou mais sinais como já detalhado no capítulo anterior.

**Sinais:** São os dados provenientes do ou enviados ao processo, advindo dos sensores ou gerados para os atuadores.

**Variáveis ambiente:** Descrevem o comportamento dos nós da rede com relação aos sinais de entrada e saída externos. Chaves de posição podem ser representadas como variáveis ambiente discretas. Informações como temperatura e velocidade de um motor podem ser descritas como variáveis ambiente contínuas.

**ECU's:** São as unidades de processamento da rede de comunicação. Englobam os nós de rede e as variáveis ambiente. Cada ECU pode englobar um ou mais nós de rede. Quando uma base de dados é criada uma ECU é instalada para cada nó.

**Nós de rede:** Os nós da rede de comunicação são as interfaces entre as ECU's e a rede de comunicação (barramento CAN). É através dos nós que as unidades de controle enviam e recebem informações através do barramento CAN. Toda a estratégia de controle está embutida nos nós de rede, os mesmos funcionam como o cérebro da ECU (controlador) contendo toda a lógica de controle e processamento do controlador. Quando um nó da rede é definido,

CANdb automaticamente define uma ECU com o mesmo nome e um link é instalado entre o novo nó e a ECU.

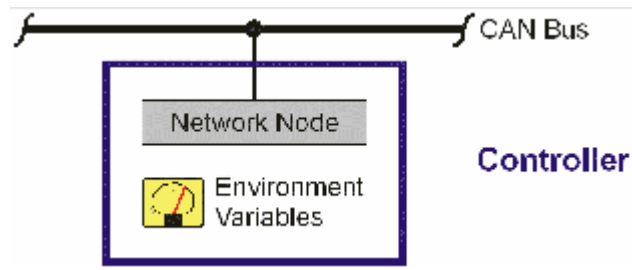


Figura 25 - Modelo de uma ECU

Vários nós de rede de comunicação podem ser associados à uma única unidade de controle, o que habilita a modelagem de Gateways, que realizam a conexão entre dois barramentos CAN.

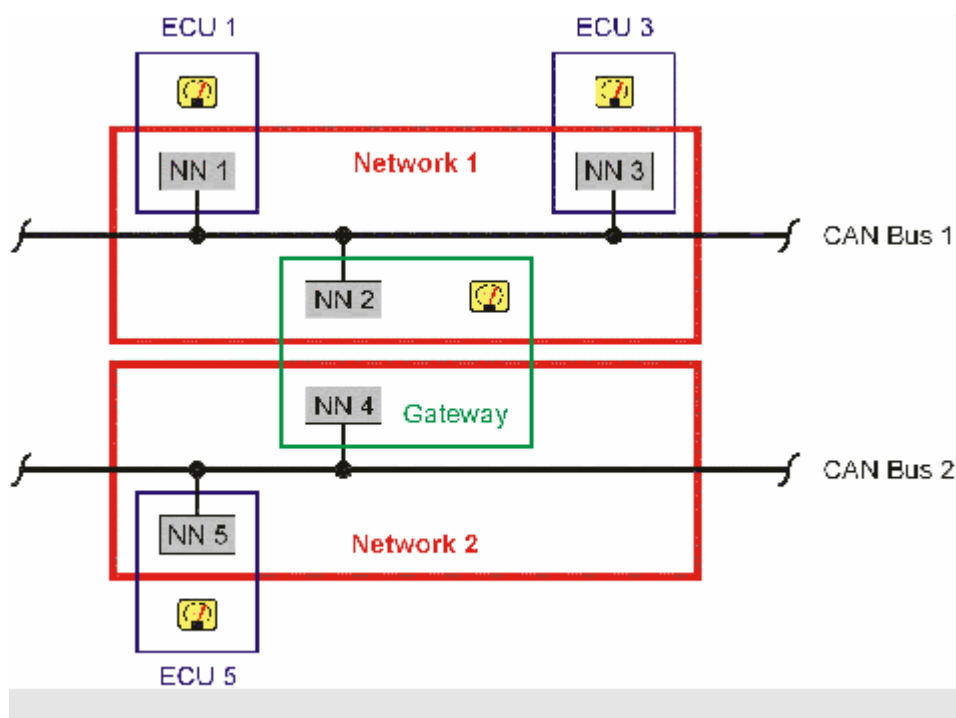


Figura 26 - Topologia de uma rede CAN utilizando Gateways

### 6.1.2 - Panel (Editor/Generator) – Interface com o usuário.

Panel Editor: Software responsável por criar os painéis de controle que funcionam como uma interface de I/O (entrada e saída) entre o usuário e os nós de rede simulados com o CANoe®. Cada display e elemento de controle deve ser configurado com uma variável ambiente pertencente a base de dados de modo que os mesmos possam ser setados ou lidos por modelos CAPL no CANoe® (as variáveis ambiente funcionam como uma "Conexão" entre os painéis e os nós de rede simulados). O Panel Editor permite a criação de periféricos para os nós de rede para que o sistema em questão possa ser simulado.

Com estes painéis o usuário pode modificar os valores das variáveis ambiente discretas ou contínuas interativamente durante a simulação.

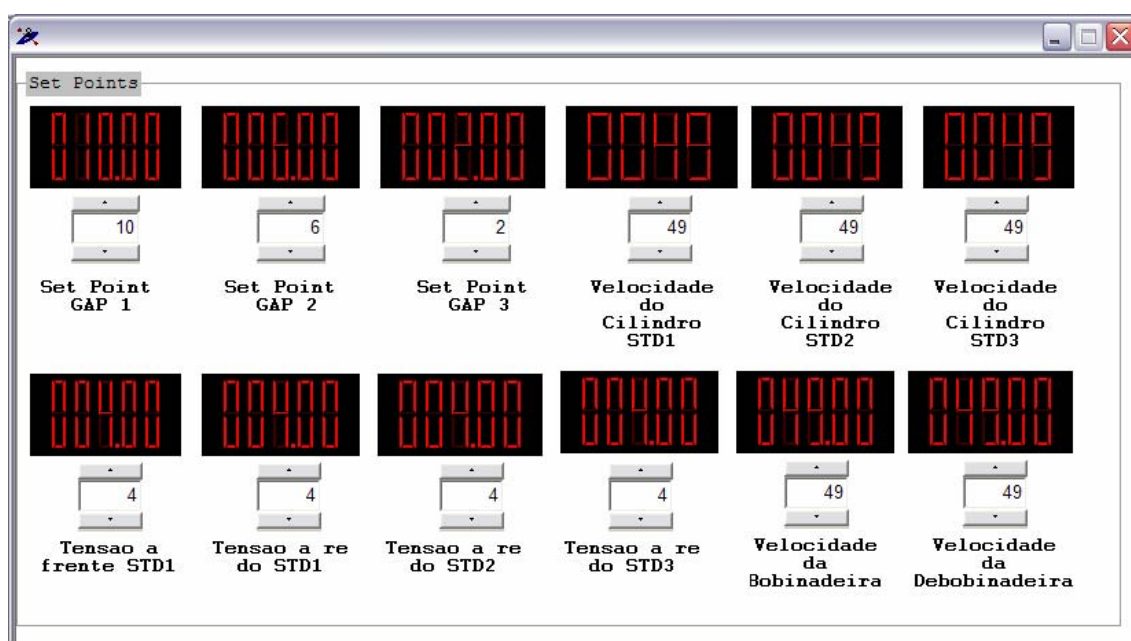


Figura 27 - Painel de controle

Todos os elementos de controle e displays (chaves e botões para variáveis ambiente discretas, sliders para variáveis ambiente contínuas, lâmpadas sinalizadoras, etc.) podem ser alocados em qualquer lugar do painel. Cada variável ambiente de uma base de dados deve ser associada a um elemento de controle.

**Panel Generator:** É uma ferramenta de geração automática de painéis que é usada para controle gráfico e visualização dos modelos dos nós da rede. A geração de painéis é baseada na base de dados da rede CAN.

#### **6.1.3 - Capl Generator – Gerador dos módulos de controle.**

O CAPL (Communication Access Programming Language) é uma linguagem baseada em eventos responsável pela programação da estrutura de controle dos nós da rede de comunicação. Toda estratégia de controle é programada em linguagem de alto nível (C, C++) . CAPL é uma linguagem procedural na qual a execução dos blocos de programa é controlada por eventos reagindo conforme a ocorrência de eventos externos (ocorrência de mensagens específicas, sinais de erro, etc. ) . Existem 3 módulos de programa relacionados ao CAPL que são : CAPL Generator, CAPL Compiler e CAPL Browser.

O CAPL Generator é uma ferramenta de geração automática de modelos de nós de rede que pode ser usado para simular um barramento CAN total ou

parcialmente utilizando o CANOE®. A geração dos modelos é baseada na base de dados CAN, através dos sinais e das mensagens associadas a cada nó de rede. O *CAPL Generator* prepara a base de dados para a geração de painéis com o software *Panel Generator*. Assim, variáveis ambiente são adicionadas à base de dados e são então associadas aos nós que as geraram de acordo com o modelo produzido. Os modelos de nós de rede são gerados como programas CAPL.

O CAPL compiler é responsável por compilar os arquivos CAPL gerados pelo CAPL generator ou pelo próprio usuário através do CAPL Browser. O CAPL Browser é um editor utilizado para criar e alterar programas CAPL. O Browser mostra os procedimentos baseados em eventos de forma estruturada permitindo criar e modificar o programa de forma simples.

#### **6.1.4 - CANoe® – Programa Principal (Gerenciador da simulação).**

Software principal utilizado para acompanhamento e simulação de redes de comunicação CAN. Pode-se associar uma ou mais bases de dados para qualquer configuração de sistema a ser simulado.

O processo de desenvolvimento de um sistema de controle baseado no protocolo CAN utilizando o CANOE® pode ser dividido em 3 estágios de desenvolvimento (figura 29).

**Fase 1:** Projeto, análise e simulação da rede de comunicação.

Primeiramente, todo o controle do sistema é distribuído entre diferentes nós de rede cuja quantidade e especificação dependerá da arquitetura e características do sistema. Isto inclui a definição dos sinais, mensagens e seleção da taxa de transmissão do barramento. Finalmente o comportamento de cada nó da rede de comunicação no barramento deve ser analisado e detalhado de acordo com a estratégia de controle realizada pelo mesmo. Então esta informação deve ser gerada por uma ferramenta de simulação (CANOE®) que fornece uma estimativa inicial da taxa de ocupação do barramento e o tempo de atraso que pode ser esperado, para cada mensagem e cada nó de rede, conforme a taxa de transmissão adotada.

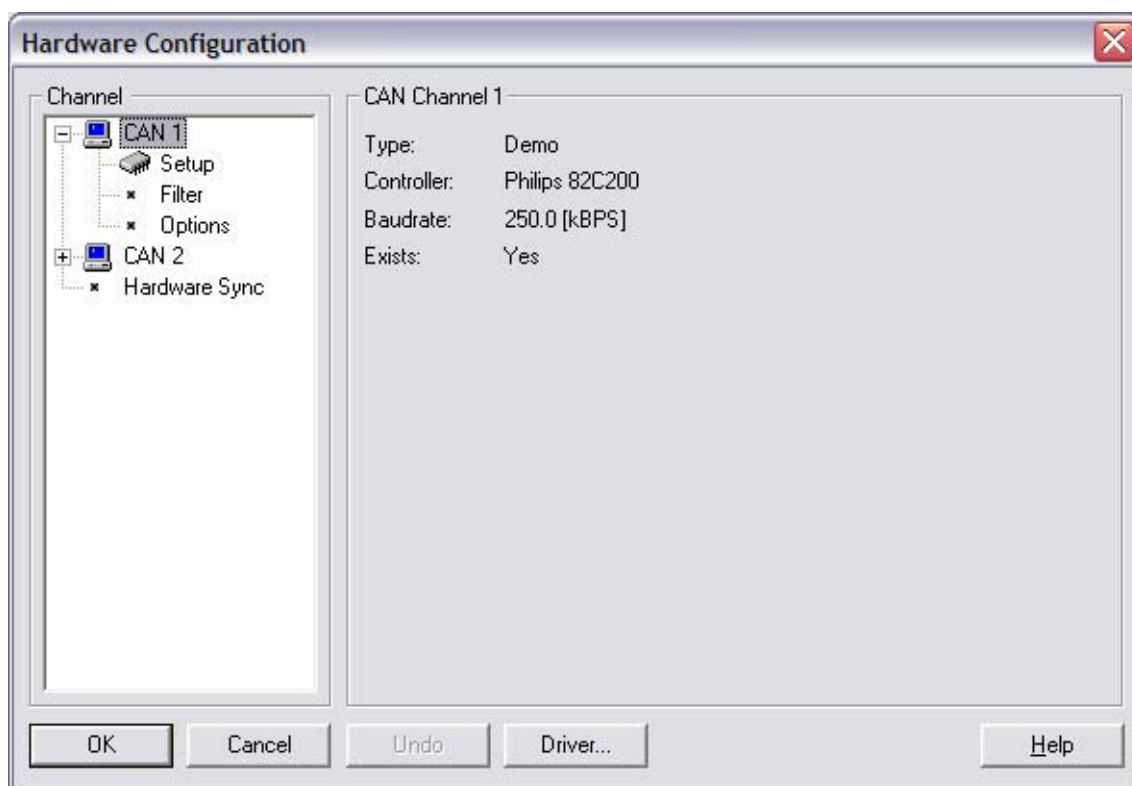


Figura 28 – Definição da taxa de transmissão

**Fase 2:** Implementação de componentes reais e simulação do restante do barramento.

Após a primeira fase ter sido completada, os nós de rede simulados são agora programados nos controladores reais e introduzidos no barramento CAN real. Os outros nós de rede simulados podem agora ser utilizados para simular o restante do barramento. A ferramenta requer uma interface com o barramento real para o simulado, e ela deve possibilitar a realização da simulação em tempo real.

**Fase 3:** Integração de todo o sistema

Na última fase de desenvolvimento todos os nós de rede simulados, com seus programas já simulados são programados em controladores reais e são conectados ao barramento CAN. O CANoe® serve agora como um “Supervisório” para observar o tráfego de mensagens entre os nós reais da rede de comunicação no barramento e compara o resultado com os valores especificados



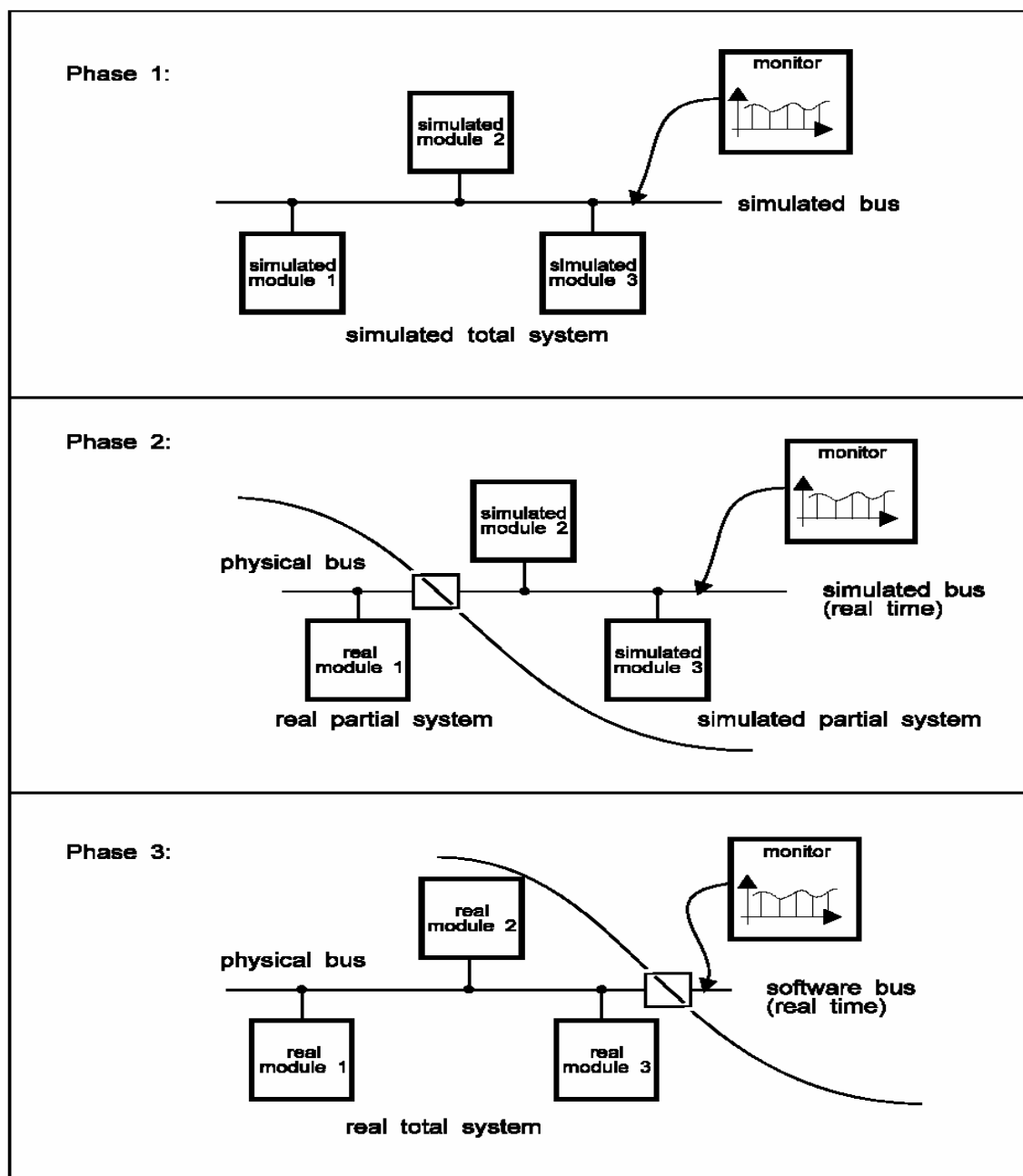


Figura 29 – Fases de desenvolvimento de um sistema de controle

Neste trabalho, somente a fase 1, que consiste na fase de análise, projeto e simulação, foi realizada.

Um modelo para simulação de sistemas distribuídos pode ser criado, utilizando o CANOE®, em 3 etapas:

- 1 - Criar o banco de dados com mensagens, sinais e variáveis ambiente (CANdb++)
- 2 - Criar a interface com os nós de rede: Painéis de Controle (Panel Editor)
- 3 - Criar os modelos dos nós de rede em CAPL (CAPL Browser/Generator)

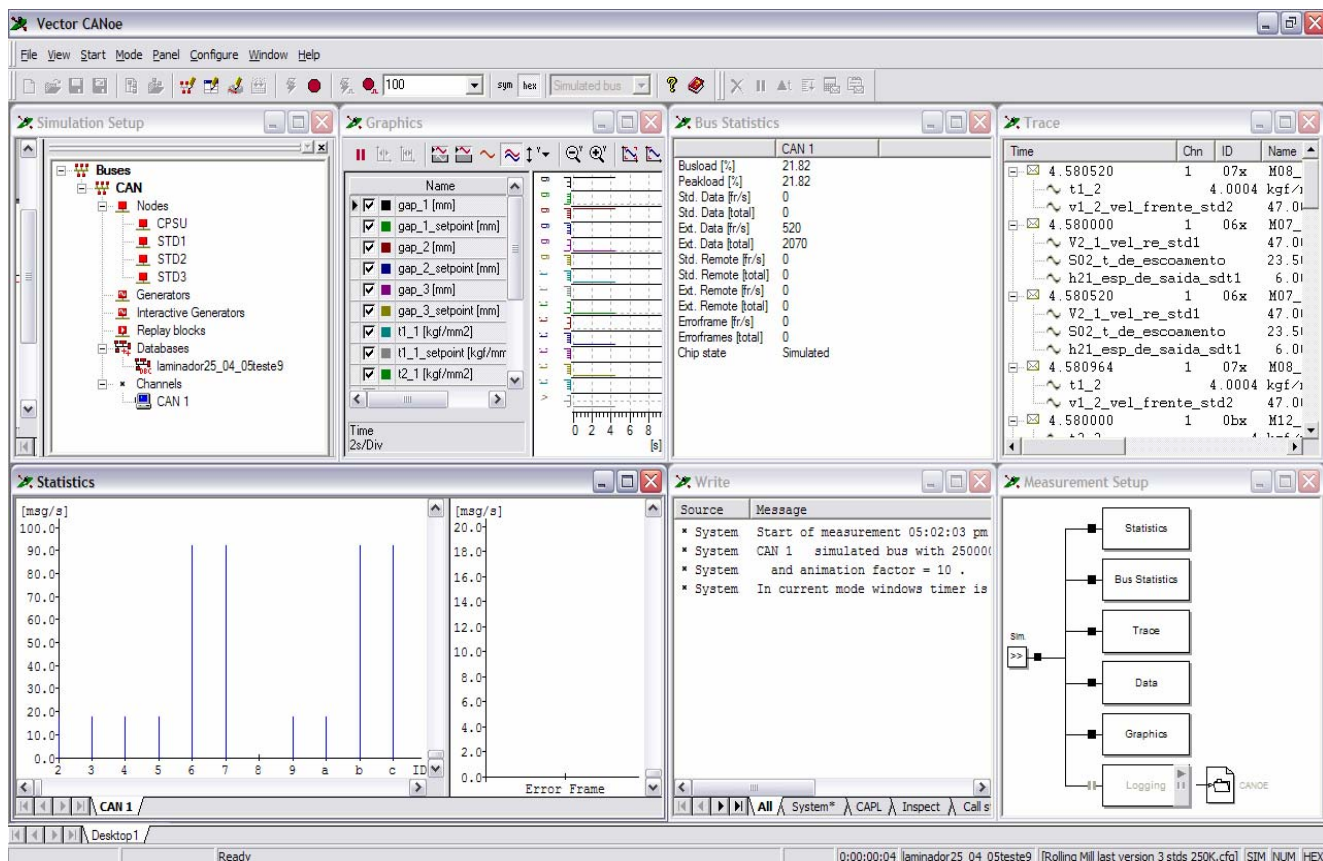


Figura 30 - Tela do simulador CANoe®

A base de dados disponibiliza as variáveis ambiente para descrever a interface de I/O entre os nós e seus periféricos. Cada periférico é ligado a uma variável ambiente e esta é associada a um programa CAPL criado para cada nó da rede onde está embutida toda a “inteligência” do controlador. Para realizar a interface destas variáveis com o ambiente externo são criados os

painéis de controle que possibilitam a visualização e alteração dos valores destas variáveis durante o processo de simulação.

Neste trabalho existem vários periféricos cujos sinais são utilizados na simulação do sistema de laminação. Cada sensor ou atuador de cada subsistema de laminação é considerado um periférico que será interfaceado com o barramento CAN através dos nós de rede. Já o interfaceamento entre os periféricos e os nós de rede é realizado através das variáveis ambiente.

Toda a visualização do andamento do processo de simulação pode ser observada através do CANoe®. O CANoe® é responsável pela medição da taxa de ocupação do barramento, pelo gerenciamento do tráfego de mensagens, filtragem de mensagens e sinais enfim toda a simulação propriamente dita é gerenciada pelo CANoe®.

O CANoe® possui várias ferramentas de análise que permitem observar o comportamento de todas as variáveis ambientes, o tráfego de mensagens, as conexões da rede do processo entre outras funcionalidades.

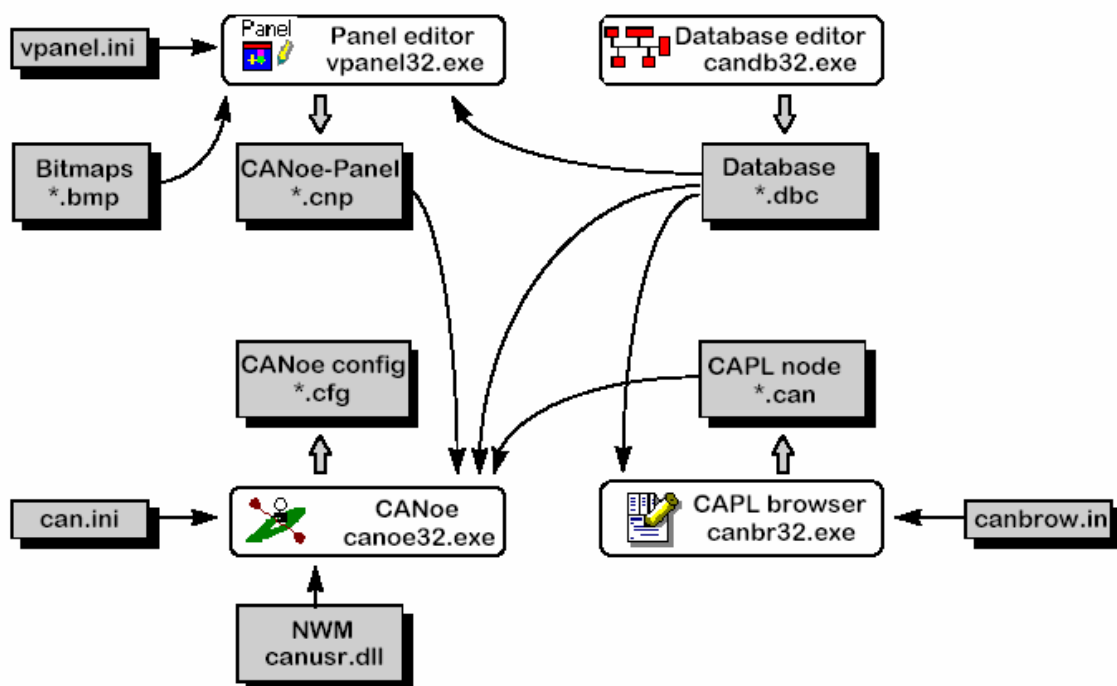


Figura 31 - Inter-relação entre os softwares do CANoe®

## **6.2 Avaliação do tráfego na rede**

### **6.2.1 Avaliação teórica**

Para chegar a uma conclusão sobre a viabilidade teórica de uma rede, alguns cálculos fazem-se necessários e alguns conceitos devem ser introduzidos:

- Cada mensagem leva um determinado tempo CC (equação 6.21) para ser disponibilizada por completo no barramento CAN, o que está relacionado com o seu tamanho, cuja parte variável é a do campo de dados ( $s$  bytes); com o tempo de um bit,  $t_{bit}$ , que é o inverso da taxa de transmissão adotada (isto é, para uma taxa de 1Mbps,  $t_{bit} = 1\mu s$ ); e deve considerar, inclusive, os bits inseridos após longa seqüência de bits idênticos (“bit stuffing”);

$$C_C = \left( \left\lceil \frac{34 + 8s}{4} \right\rceil + 47 + 8s \right) \cdot t_{bit} \quad (6.21)$$

- O pior caso de atraso, CR, para a completa transmissão de uma mensagem se dá quando ela disputa o barramento com todas as mensagens de prioridade maior que a sua, levando-a a esperar pela transmissão de todas elas para só então ser enviada, ou seja, o CR desta mensagem é a soma dos CC de todas as mensagens mais prioritárias com o seu próprio CC. Já para a mensagem de maior prioridade, o pior caso se dá quando o barramento acabou de ser

conquistado pela mensagem de maior tamanho, devendo ela esperar pelo fim desta transmissão, ou seja, o CR da mensagem mais prioritária é a soma do seu CC com o maior CC dentre todas as mensagens da rede;

- Outro parâmetro importante na avaliação da rede, a utilização teórica do barramento, BU, em uma rede de n mensagens, é dado pela equação 6.22.

$$\sum_{i=1}^n (C_{C,i}/C_{T,i}) \quad (6.22)$$

- E, finalmente, se valida à rede quando o atraso de cada uma das mensagens, no pior caso, CR, for inferior ao seu atraso máximo permitido de projeto, CD, estando o percentual de utilização do barramento, BU, em um patamar aceitável.

Para a rede CAN1, foi feita a análise para uma taxa de transmissão de 250 kbps, que é uma limitação imposta pelo comprimento do cabeamento do seu barramento, considerando-se um distanciamento pouco superior a 100 metros entre a CPSU (cabine de operação) e as cadeiras (que estariam localizados próximos aos controladores locais, uma vez que pelas redes CAN2 CAN3 e CAN4 trafegam um volume maior de dados, cuja grande parte é crítica e exige sua rápida disponibilização aos controladores de destino, logo, requer-se uma velocidade consideravelmente mais alta, e, conseqüentemente, distâncias menores).

Recordando, a criticidade maior, nesta primeira rede analisada, é a da comunicação entre Cadeiras (controle “feedforward”), que tem papel crucial na correção de distúrbios, pela grande interação entre cadeiras de laminadores em tandem, mas que cujo atraso máximo esperado é ainda muito inferior ao tempo de trajeto da tira entre uma cadeira a outra, que é da ordem de segundos. A prioridade maior (tolerância menor quanto a atrasos na transmissão), no entanto, é dada para as intervenções do operador do sistema, que, se presume, seriam esporádicas neste processo automatizado.

Tabela 14 – Mensagens da CAN1 ordenadas pela prioridade

<b>Mensagem / Prioridade na CAN1</b>	<b>Componentes da Mensagem</b>	<b>C<sub>T</sub> [ms]</b>	<b>C<sub>D</sub> [ms]</b>	<b>Nº de Bytes</b>	<b>C<sub>C</sub> [ms]</b>	<b>C<sub>R</sub> [ms]</b>
01	M103	5	5	6	0,462	1,004
02	M102	5	5	6	0,462	1,468
03	M101	5	5	8	0,542	2,010
04	M110	10	10	8	0,542	2,552
05	M106	10	10	8	0,542	3,094
06	M113	10	10	4	0,382	3,476
07	M109	10	10	4	0,382	3,858
08	M111	50	10	6	0,462	4,320
09	M112	50	10	6	0,462	4,782
10	M107	50	10	6	0,462	5,244
11	M108	50	10	4	0,382	5,626
12	M104	50	10	8	0,542	6,168
13	M105	50	10	6	0,462	6,630

### Memorial de Cálculo

Tempo de transmissão das mensagens (por tamanho do campo de dados, em bytes):

$$C_{C(4 \text{ bytes})} = \left( \left\lceil \frac{34 + 8 \cdot 4}{4} \right\rceil + 47 + 8 \cdot 4 \right) \cdot \frac{1}{250k} = 0,382 [ms]$$

$$C_{C(6 \text{ bytes})} = 0,462 [ms] \quad / \quad C_{C(7 \text{ bytes})} = 0,502 [ms] \quad / \quad C_{C(8 \text{ bytes})} = 0,542 [ms]$$

Maior atraso calculado para a mensagem de maior prioridade (M103):

$$C_{R(M103)} = C_{C(M103)} + \max(C_{C(CAN1)})$$

$$C_{R(M103)} = C_{C(6 \text{ bytes})} + C_{C(8 \text{ bytes})} = 1,004 [ms]$$

$$\text{Utilização do barramento: } BU = \sum_{i=1}^{15} (C_{C,i} / C_{T,i}) = 0,5334 \Rightarrow \underline{53,34\%}$$

Ainda que com velocidade limitada, esta rede atende, teoricamente com relativa folga, ao processo em questão, tanto no que diz respeito a tempo de atraso máximo de projeto (excedendo em mais de 50% o atraso máximo calculado para a mensagem 13) quanto na utilização do barramento, havendo disponibilidade de quase metade de sua largura de banda para tratar, com mínimos prejuízos para o processo, falhas de comunicação e para suportar uma atividade do controle “feedforward” superior à prevista.

Já para as redes CAN2, CAN3 e CAN4, pelos motivos já enunciados, adota-se uma taxa de transmissão maior, no caso, o limite de uma rede CAN: 1 Mbps. Aqui, priorizam-se as mensagens associadas à terceira cadeira, depois as da segunda e finalmente as da primeira (como na CAN1), e para cada uma destas Cadeiras ordena-se as mensagens por:



1° - Valores medidos (da mensagem que contém P e g, parte-se para a transmissão das demais);

2° - Ações de controle

As mensagens de setup (inicialização) dos controladores, assim como na rede CAN1, não disputam o barramento com as demais mensagens da rede, sendo transmitidas antes do início da laminação de determinado produto, e, por conseguinte, tendo requisitos bem menos rigorosos de tempo não foram considerados para o cálculo da taxa de ocupação do barramento.

Tabela 15 – Mensagens da CAN2 ordenadas pela prioridade

<b>Mensagem / Prioridade na CAN2</b>	<b>Componentes da Mensagem</b>	<b>C<sub>T</sub> [ms]</b>	<b>C<sub>D</sub> [ms]</b>	<b>Nº de Bytes</b>	<b>C<sub>C</sub> [ms]</b>	<b>C<sub>R</sub> [ms]</b>
01	M205	5	5	8	0,135	0,27
02	M206	5	5	4	0,095	0,365
03	M203	5	5	4	0,095	0,46
04	M207	5	5	2	0,075	0,535
05	M201	5	5	2	0,075	0,61
06	M202	5	5	4	0,095	0,705
07	M204	1000	1000	4	0,095	0,8

*Memorial de Cálculo-CAN2*

Tempo de transmissão das mensagens (por tamanho do campo de dados, em bytes):

$$C_{C(2\text{ bytes})} = \left( \left\lceil \frac{34 + 8 \cdot 2}{4} \right\rceil + 47 + 8 \cdot 2 \right) \cdot \frac{1}{1\text{M}} = 0,075[\text{ms}] \quad / \quad C_{C(4\text{ bytes})} = 0,095[\text{ms}]$$

$$C_{C(8\text{ bytes})} = 0,135[\text{ms}]$$

Maior atraso calculado para a mensagem de maior prioridade (M205):

$$C_{R(M219)} = C_{C(M205)} + \max(C_{C(\text{CAN2})})$$

$$C_{R(M219)} = C_{C(8\text{ bytes})} + C_{C(8\text{ bytes})} = 0,270[\text{ms}]$$

$$\text{Utilização do barramento: } BU = \sum_{i=1}^7 (C_{C,i}/C_{T,i}) = 0,1140 \Rightarrow \underline{11,40\%}$$

Tabela 16 – Mensagens da CAN3 ordenadas pela prioridade

Mensagem / Prioridade na CAN3	Componentes da Mensagem	C <sub>T</sub> [ms]	C <sub>D</sub> [ms]	Nº de Bytes	C <sub>C</sub> [ms]	C <sub>R</sub> [ms]
01	M305	5	5	8	0,135	0,27
02	M303	5	5	4	0,095	0,365
03	M306	5	5	4	0,095	0,46
04	M302	5	5	4	0,075	0,535
05	M307	5	5	2	0,075	0,61
06	M301	5	5	2	0,075	0,705
07	M304	1000	1000	4	0,095	0,8

*Memorial de Cálculo-CAN3*

Tempo de transmissão das mensagens (por tamanho do campo de dados, em bytes):

$$C_{C(2\text{ bytes})} = \left( \left[ \frac{34 + 8 \cdot 2}{4} \right] + 47 + 8 \cdot 2 \right) \cdot \frac{1}{1M} = 0,075 [ms] \quad / \quad C_{C(4\text{ bytes})} = 0,095 [ms]$$

$$C_{C(8\text{ bytes})} = 0,135 [ms]$$

Maior atraso calculado para a mensagem de maior prioridade (M305):

$$C_{R(M219)} = C_{C(M205)} + \max(C_{C(CAN2)})$$

$$C_{R(M219)} = C_{C(8\text{ bytes})} + C_{C(8\text{ bytes})} = 0,270 [ms]$$

$$\text{Utilização do barramento: } BU = \sum_{i=1}^7 (C_{C,i} / C_{T,i}) = 0,1100 \Rightarrow \underline{11,00\%}$$

Tabela 17 – Mensagens da CAN4 ordenadas pela prioridade

Mensagem / Prioridade na CAN2	Componentes da Mensagem	C <sub>T</sub> [ms]	C <sub>D</sub> [ms]	Nº de Bytes	C <sub>C</sub> [ms]	C <sub>R</sub> [ms]
01	M405	5	5	8	0,135	0,27
02	M407	5	5	4	0,095	0,365
03	M406	5	5	4	0,095	0,46
04	M402	5	5	4	0,095	0,535
05	M401	5	5	2	0,075	0,61
06	M403	5	5	2	0,075	0,705
07	M404	1000	1000	4	0,095	0,8

### Memorial de Cálculo-CAN4

Tempo de transmissão das mensagens (por tamanho do campo de dados, em bytes):

$$C_{C(2\text{ bytes})} = \left( \left\lceil \frac{34 + 8 \cdot 2}{4} \right\rceil + 47 + 8 \cdot 2 \right) \cdot \frac{1}{1\text{M}} = 0,075[\text{ms}] \quad / \quad C_{C(4\text{ bytes})} = 0,095[\text{ms}]$$

$$C_{C(8\text{ bytes})} = 0,135[\text{ms}]$$

Maior atraso calculado para a mensagem de maior prioridade (M405):

$$C_{R(M\ 219)} = C_{C(M\ 205)} + \max(C_{C(\text{CAN2})})$$

$$C_{R(M\ 219)} = C_{C(8\text{ bytes})} + C_{C(8\text{ bytes})} = 0,270[\text{ms}]$$

$$\text{Utilização do barramento: } BU = \sum_{i=1}^7 (C_{C,i}/C_{T,i}) = 0,1100 \Rightarrow \underline{11,00\%}$$

Não havendo, nas sub-redes CAN2, CAN3 e CAN4, o limite de velocidade imposto pelo comprimento do cabeamento, como na CAN1, podendo-se utilizar a taxa de transmissão de 1M bit/s, os atrasos calculados estão ainda mais distantes dos valores de projeto e se conta com uma utilização muito baixa do barramento, aproximadamente 11%, fundamental em se tratando da rede que contém os principais controladores do sistema e da qual se espera uma atividade muito intensa.

Os valores iguais para as taxas de ocupação do barramento já eram previstos já que as três subredes tem as mesmas características e se encarregam de gerenciar uma quantidade definida e semelhante de subsistemas de laminação.

Qualifica-se, portanto, teóricamente, a rede CAN, conforme especificada nesta Seção 3.3.2, como apta a atender às necessidades de tal processo de laminação, se destacando nos quesitos simplicidade e custo (da solução do sistema de controle como um todo, que tal rede viabilizou), porém, sem abdicar de confiabilidade e boa performance.

Na próxima seção a rede projetada será simulada e os resultados práticos da simulação serão comparados com os resultados teóricos

#### **6.2.2 – Avaliação pelo simulador**

O processador utilizado pelo simulador para simular os controladores utilizados nos subsistemas de laminação foi o 82C200 da Philips como pode se observar na figura 28 da seção 6.1.4.

O valor obtido para a taxa de ocupação do barramento na simulação da rede CAN1 foi de 49,9%, bem próximo do valor calculado teóricamente para a mesma taxa que foi de 53,34%. A diferença de aproximadamente 3% se deve ao fato de algumas mensagens terem sido modificadas em relação às propostas teoricamente.

Já nas redes CAN2, CAN3 e CAN4 os valores obtidos nas simulações de para a taxa de ocupação destas redes foram 11,04%, praticamente o mesmo

que o encontrado na avaliação teórica (11%) o que significa um erro praticamente nulo.

. Deve-se ressaltar que os valores de taxa de ocupação do barramento de todas as redes de comunicação (CAN1, CAN2, CAN3 e CAN4) foram encontrados simulando o processo de laminação em condições normais de funcionamento sem levar em consideração o tempo de tomada de decisão, para geração e envio das mensagens, por parte da estratégia de controle já que esta não foi implementada.

## **7-Conclusões**

### **7.1 – Volume de tráfego e viabilidade da rede**

A proposta inicial deste trabalho era a simulação da rede de controle e comunicação proposta inicialmente por Muniz [4] tendo em vista validar a avaliação teórica da rede em questão proposta pelo mesmo. Devido à limitação do simulador adotado, realizou-se um conjunto de modificações tanto na composição das mensagens quanto na definição dos nós da rede.

Os resultados alcançados foram altamente satisfatórios visto que a avaliação teórica e simulada do tráfego de mensagens, tendo como principal parâmetro a taxa de ocupação do barramento, mostraram resultados praticamente idênticos revelando assim a viabilidade da rede de comunicação proposta.

Como resultado relevante deste trabalho também se pode resaltar a descoberta do CANOE, uma ferramenta computacional bastante eficaz na simulação e desenvolvimento de redes que pode servir de auxílio para diversos estudos e desenvolvimento de redes de comunicação e controle industriais e automotivas em geral baseadas no protocolo CAN e seus derivados.

### **7.2 – Sugestões de trabalhos futuros**

Como a versão demo do simulador adotado limitou o uso de nós para a simulação fica como proposta para trabalhos futuros a implementação da rede por completo, ou seja, a simulação de todos 13 nós simultaneamente utilizando gateways para realizar a comunicação entre as rede CAN1 e suas sub redes.

Fica também como sugestão a implementação no simulador, através da linguagem de programação do software CAPL, da estratégia de controle proposta por Muniz [4] gerando assim um modelo de simulação completo da rede de comunicação e controle do laminador de tiras proposto neste trabalho.



## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OROWAN, E. **The calculation of roll pressure in hot and cold rolling.** Proc. Inst. of Mechanical Engineers, v. 150, p. 140-167, fev. 1944.
- [2] ALEXANDER, J. M. **On the theory of rolling.** Proc. R. Soc. London, v. 326, p. 535-563. 1972.
- [3] DENTI FILHO, José. **Um método de controle dinâmico de laminadores reversíveis.** 1994. Tese (Doutorado em Metalurgia) - PPGEM-EEUFMG.
- [4] MUNIZ, Bruno M., **Proposta de estratégia de controle para um laminador de tiras teórico com três cadeiras em Tandem.** 2002. Tese (Mestrado em automação) - PPGEE-UFES.
- [5] HELMAN, H., CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais.** Fundação Christiano Ottoni. Belo Horizonte, 1993.
- [6] SILVA, A. M. S. **Análise do processo de laminação a quente.** 1978. Dissertação (Mestrado em Metalurgia) - EEUFMG.
- [7] MUNIZ, Bruno M., DENTI FILHO, José. Metodização do controle do processo de laminação de tiras - Lamina Pro 1.0. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 53., 1998, Belo Horizonte. **Anais do 53º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais** [CD-ROM]. Belo Horizonte : ABM, 1998. abm98.pdf, p. 2248-2257.
- [8] BRYANT, G. F. **Automation of tandem mills.** The Iron and Steel Institute, 1973.
- [9] BOYER, Howard E. **Atlas of stress-strain curves.** ASM International, 1987.

- [10] DIEGUEZ, J. P. P. **Métodos numéricos computacionais para engenharia.** Âmbito Computacional, v. 2, 1994.
- [11] LAWRENZ, Wolfhard. **CAN system engineering : from theory to practical applications.** Springer, 1997.
- [12] INSTITUTE OF ELECTRIC AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE floating-point standard : 754,** 1985.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Referências bibliográficas : NBR 6023.** Rio de Janeiro, 1989.
- [14] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. **Normalização e apresentação de trabalhos científicos e acadêmicos : guia para alunos, professores e pesquisadores da UFES.** 3. ed. rev. Vitória : A Biblioteca, 1998.